

VŠB – Technická Univerzita Ostrava
Fakulta Elektrotechniky a Informatiky
Katedra Elektroenergetiky

Možnosti využití diagnostiky poruch asynchronních
motorů

Possibilities of Frequency Analysis Use of Electric
Values for Asynchronous Motors Diagnostics

2017

Bc. Kamil Horenský

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Kamil Horenský**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Možnosti využití diagnostiky poruch asynchronních motorů**
Possibilities of Frequency Analysis Use of Electric Values for
Asynchronous Motors Diagnostics
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Druhy a metody diagnostiky poruch asynchronních motorů
- 2) Rozbor frekvenční analýzy a aplikace
- 3) Měření na různých typech asynchronních motorů
- 4) Vyhodnocení a rozbor vhodnosti použití frekvenční analýzy v diagnostice
- 5) Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


- 1) Petrov, G.N.-Elektrické stroje 2, Academia 1982
- 2) Boldea, I.; Nasar, S.A.-The Induction Machine Handbook, CRC Press 2001
- 3) Černý, Z.; Čaha, M.- Elektrické pohony, SNTL 1990
- 4) Hrabovcová, V. a kol.- Meranie a modelovanie elektrických strojov, Žilina 2000
- 5) Tůma, J.- Zpracování signálů z mechanických systémů užitím FFT, Štramberk 1997

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Čech, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

28.4.2017

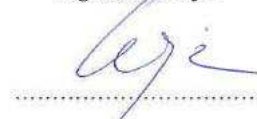
V Ostravě



Bc. Kamil Horenský

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava.

Ing. Martin Bajer



25. 4. 2014

Ve Frenštátě pod Radhoštěm

Vedoucí Research & Development

Siemens s.r.o, o.z. Elektromotory Frenštát

Rád bych poděkoval Ing. Václavu Čechovi Ph.D, Ing. Stanislavu Rusnokovi, Ing. Pavlu Sobotovi a Bc. Ondřeji Orságovi za odborné konzultace při realizaci této práce.

Dále chci poděkovat Ing. Stanislavu Plačkovi, Janu Bajerovi a Ing. Zdeňku Halamíčkoví za pomoc při realizaci rozsáhlého měření na hlavní zkušebně firmy Siemens s.r.o, o.z. Elektromotory Frenštát.

Abstrakt a klíčová slova

Abstrakt

Tato práce se zabývá diagnostikováním vady nedolitých rotorových klecí u asynchronního motoru. V první části práce jsou popsány jednotlivé druhy a metody diagnostiky poruch u asynchronních motorů. Je zde popsána diagnostická metoda frekvenční analýzy pomocí statorového proudu, díky které lze tuto vadu odhalit nedestruktivní metodou. Větší část této práce je věnována praktickému měření, ve kterém bylo možné porovnat výsledky rotoru bez vady a rotoru s částečně nedolitou rozběhovou klecí. Výsledky měření jsou prezentovány ve čtvrté kapitole této práce.

Klíčová slova: asynchronní motor, diagnostika, frekvenční analýza, rotorové tyče, DFT, statorový proud

Abstract

This thesis discusses fault diagnosis of cast rotor in asynchronous motors. The introductory part of the thesis describes various methods of fault diagnosis in asynchronous motors. Here, the method of frequency-analysis with the help of stator current is detailed. Thanks to this, fault detection is possible through non-destructive methods. The main part of this thesis focuses on practical measurements, where it was possible to compare results of rotors, both with and without faults, in partly rotor bars. The findings are presented in the fourth chapter of this thesis.

Key words: asynchronous motor, diagnostics, frequency analysis, rotor bars, DFT, stator current

Obsah

Úvod	12
1.0 Druhy a metody diagnostiky poruch asynchronních motorů	13
1.1 Druhy poruch asynchronních strojů	13
1.2 Poruchy aktivních částí	13
1.3 Porucha mechanické části	17
1.4 Metody diagnostiky poruch asynchronních motorů	19
2.0 Rozbor frekvenční analýzy a aplikace	21
2.1 FT	22
2.2 Aplikace frekvenční analýzy	23
2.3 MKP	26
3.0 Měření na asynchronním motoru	31
3.1 Popis měření	31
3.2 Frekvenční analýza statorového proudu	35
3.3 Typová zkouška	40
3.4 Měření záběrných hodnot	43
3.5 Seznam měřících zařízení	46
4.0 Vyhodnocení a rozbor vlastností použití frekvenční analýzy v diagnostice	47
5.0 Závěr	48

Seznam použitých symbolů a zkratek

n	Otáčky	(min ⁻¹)
n_s	Synchronní otáčky	(min ⁻¹)
P_n	Jmenovitý výkon	(W)
P	Výkon	(W)
I	Proud	(A)
I_n	Jmenovitý proud	(A)
I_m	Maximální okamžitý proud	(A)
I_{zab}	Záběrný proud	(A)
s	Skluz	(-)
f	Frekvence	(Hz)
f_1	Frekvence sítě	(Hz)
f_2	Frekvence rotoru	(Hz)
f_{p+}	Frekvence postranního pásma	(Hz)
f_{p-}	Frekvence postranního pásma	(Hz)
α	Pozice rotoru	(°)
U	Napětí	(V)
U_n	Jmenovité napětí	(V)
U_k	Napětí nakrátko	(V)
M	Moment	(Nm)
M_n	Jmenovitý moment	(Nm)
M_{zv}	Moment zvratu	(Nm)
M_{zam}	Záběrný moment	(Nm)
I_o	Proud naprázdno	(A)
P_o	Příkon naprázdno	(W)

U/U_k	Poměrné napětí	(-)
t	Čas	(s)
P_1	Příkon	(W)
φ	Účíník	(-)
η	Účinnost	(%)
ϑ	Oteplení	(K)
M_{zv}/M	Poměrný moment zvratu	(-)
M_{zab}/M	Poměrný záběrný moment	(-)
I_{zab}/I	Poměrný záběrný proud	(-)
J	Proudová hustota	(A/m ²)

FT	Fourierova Transformace
FFT	Rychlá Fourierova Transformace
DFT	Diskrétní Fourierova Transformace
MKP	Metoda konečných prvků
IM	Způsob uchycení motoru
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise

Seznam ilustrací

- Obr. 1: Teplotní pole u přechodového odporu kontaktu
- Obr. 2: Nedolitý rotor po částečném obrobení (pohled na rozběhovou klec)
- Obr. 3: Ložiskové proudy
- Obr. 4: Vnější kroužek kuličkového ložiska narušený ložiskovými proudy
- Obr. 5: Druhy excentricit
- Obr. 6: Frekvenční spektrum proudu u motoru s poruchou rotoru
- Obr. 7: Fourierova transformace obdélníkového signálu
- Obr. 8: Magnetický tok při jmenovitém provozním stavu motoru s poruchou rotoru
- Obr. 9: Magnetický tok v záběrném stavu motoru s poruchou rotoru
- Obr. 10: Závislost proudové hustoty na hloubce rotorové drážky
- Obr. 11: Vektory proudů tekoucích rotorovou klecí
- Obr. 12: Závislost proudové hustoty na hloubce rotorové drážky s poruchou
- Obr. 13: Část modelu porušené rotorové klece
- Obr. 14: Poškození rotoru před odlitím klece
- Obr. 15: Schéma zapojení měřicího přístroje
- Obr. 16: Měřený motor Siemens 1LE1501-2BB2-34JB4
- Obr. 17: Postranní pásma při 50%P_n
- Obr. 18: Postranní pásma při 100%P_n
- Obr. 19: Postranní pásma při 150%P_n
- Obr. 20: Kaskádový graf závislosti frekvence a amplitudy postranních pásem na skluzu motoru
- Obr. 21: Frekvenční spektrum s postranními pásmy kolem vyšších harmonických
- Obr. 22: Momentová charakteristika
- Obr. 23: Závislost proudu na skluzu
- Obr. 24: Charakteristiky nakrátko
- Obr. 25: Charakteristiky naprázdno
- Obr. 26: Vzájemná poloha drážek statoru a rotoru
- Obr. 27: Závislost záběrného momentu na úhlu natočení rotoru
- Obr. 28: Závislost záběrného proudu na úhlu natočení rotoru

Seznam tabulek

Tab. 1: Vybrané štítkové data

Tab. 2: Jmenovité hodnoty motoru

Tab. 3: Postranní pásma při 50%P_n

Tab. 4: Postranní pásma při 100%P_n

Tab. 5: Postranní pásma při 150%P_n

Tab. 6: Amplitudy postranních pásem při změně skluzu

Tab. 7: Amplitudy postranních pásem vyšších harmonických

Tab. 8: Srovnání některých parametrů typových zkoušek

Úvod

Je tomu již 130let, kdy byl Nikolajem Teslou patentovaný asynchronní stroj. Od té doby proběhla řada úprav, které vedly především ke zmenšení objemu a hmotnosti stroje vzhledem k jeho výkonu, ke zvyšování účinnosti a v neposlední řadě ke zvýšení spolehlivosti tohoto zařízení. Tyto tři faktory jsou ovlivněny konstrukčním návrhem stroje, kvalitou technologického zpracování a kvalitou použitých materiálů. V poslední době je kladen velký důraz na výrobu strojů, které musí splňovat vysoké nároky na účinnost přeměny energie.

Ačkoli je asynchronní stroj nejpoužívanějším elektromotorem především kvůli jeho jednoduchosti a spolehlivosti, stále je třeba se zabývat jeho poruchami. Při diagnostice je třeba zjistit, zda porucha nastala z důvodu nesprávného provozu stroje, výrobní vady, nebo běžným koncem životnosti dané komponenty. V případě nesprávného provozu stroje (trvalé přetížení, neodpovídající okolní podmínky, zanedbaná údržba) lze v budoucnu zajistit správnou funkci vhodným dimenzováním stroje na dané podmínky a vhodnou volbou ochran. Pokud již nastane stav, který evidentně ohrožuje správnou funkci motoru, je třeba poruchu co nejdříve analyzovat a zajistit její opravu.

Jako příklad uvedeme motor s poškozenými ložisky. Ložiska mohla být znehodnocena nedodržením mazacího intervalu, nesprávným ustavením motoru vzhledem k pracovnímu mechanismu, nadměrnou silou působící v axiálním směru na hřídel, nebo přítomností ložiskových proudů. Pokud je při diagnostice naměřeno hřídelové napětí, které ohrožuje dobu životnosti ložiska, je třeba využít izolované ložisko nebo jiné opatření pro zamezení průtoku proudu přes ložiskové uzly. Díky správné analýze problému lze tedy v budoucnu předcházet podobným problémům a tím zajistit správnou funkci daného zařízení.

V první části této práce jsou popsány nejčastější poruchy asynchronních strojů včetně možností odhalení těchto poruch. Ve druhé části je popsána podstata diagnostické metody pomocí frekvenční analýzy včetně možností jejího využití. Třetí kapitola je věnována praktickému měření, které proběhlo na hlavní zkušebně firmy Siemens s.r.o., o.z. Elektromotory Frenštát. Pro tento účel byl vyroben rotor s částečně nedolitou rozběhovou klecí. Při měření bylo tedy možné porovnat výsledky jednoho motoru se dvěma rozdílnými rotory. Měření bylo zaměřeno především na diagnostikování poruchy frekvenční analýzou pomocí statorových proudů. Dále byla na obou variantách měřena typová zkouška, díky které bylo možné porovnat potřebné veličiny a zjistit jejich závislost na této poruše. Jako poslední bylo provedeno měření se zablokovaným rotorem ve více polohách. Díky tomuto měření bylo možné zjistit závislost záběrného momentu a záběrných proudů ve všech třech fázích v závislosti na úhlu natočení rotoru.

Vyhodnocení měření pomocí frekvenční analýzy je prezentováno ve čtvrté kapitole. Kompletní vyhodnocení měření je uvedeno v závěru této práce.

1.0 Druhy a metody diagnostiky poruch asynchronních motorů

1.1 Druhy poruch asynchronních strojů

Ačkoli je asynchronní stroj s kotvou nakrátko relativně spolehlivý a bezúdržbový, může se také u něj vyskytnout celá řada poruch. Závady na točivých elektrických strojích můžeme dělit podle několika hledisek. Podle druhu můžeme dělit na poruchy aktivních částí a na poruchy mechanických částí. Poruchy aktivních částí jsou obvykle způsobeny závadou na izolačním systému. To může být zapříčiněno například nadměrným přetěžováním stroje, provozu v nepřiměřených klimatických podmínkách nebo výrobní vadou. U mechanických závad se jedná především o problémy s ložiskovými uzly. U asynchronních strojů s kotvou nakrátko jsou ložiska jediná část, u které je potřeba v pravidelných časových intervalech dělat údržbu. Jedná se pouze o motory s možností doplnění vazelíny pro správnou funkci ložisek. Mimo doplňování vazelíny je také potřeba trvale udržovat povrch motoru v čistotě, a to z důvodu správné funkce chladicího systému.

1.2 Poruchy aktivních částí

Zkrat statorového vinutí

Při poklesu elektrické pevnosti pod danou hodnotu může nastat zkrat mezi závity, zkrat na kostru, nebo zkrat mezi fázemi. Kterákoliv z těchto poruch vede obvykle k neopravitelné destrukci stroje. S výjimkou zkratu na kostru se poruchy nejvíce vyskytují v čelech vinutí, kde je obvykle nejvyšší teplota v celém stroji. Tepelné, elektrické a mechanické namáhání jsou faktory, které ovlivňují elektrickou pevnost dané části. Dále je elektrická pevnost vinutí zásadně ovlivněna kvalitou technologického postupu vložení vinutí do drážek statoru. Při poškození laku drátu například o statorovou část může vést k úplnému znehodnocení celého motoru. Elektrická pevnost laku pro izolaci jednotlivých vodičů je přibližně 150kV/mm. Vrstva pokrývající vodič je v několika setin mm, takže je třeba dbát velké opatrnosti při vkládání cívek do srážek statoru. Ve statorovém vinutí jsou dále použity drážková a mezifázová izolace. Tato izolace je obvykle vyrobena z netkané skelné textilie, která při procesu impregnace vytvoří dostatečnou ochranu proti zkratům.

Zkrat mezi plechy

Z důvodu omezení ztrát vířivými proudy je magnetický obvod tvořen vzájemně izolovaný izotropními plechy. Tloušťka izolace jednotlivých plechů je tvořena povrchovou úpravou, která má tloušťku pouze několik tisícín mm. Proto při nešetrném zacházení s tímto materiálem může být izolace znehodnocena. V takovém místě začnou vznikat lokálně vyšší ztráty vířivými proudy, tím pádem se

místo poškození začne více zahřívat. Díky této poruše může zvýšené oteplení přesáhnout teplotní třídu použitého izolačního systému, a tím následně způsobit poruchu izolačního systému elektrických částí. Poruchy tohoto typu jsou díky kvalitě izolace plechů velmi výjimečné. U rotorů s litou klecí je třeba zohlednit teplotu hliníku při lití a velikost rotorové drážky při volbě teplotní třídy izolace plechu. Při nevyhovující teplotní třídě laku by mohla být znehodnocená velká část izolace v okolí rotorové drážky.

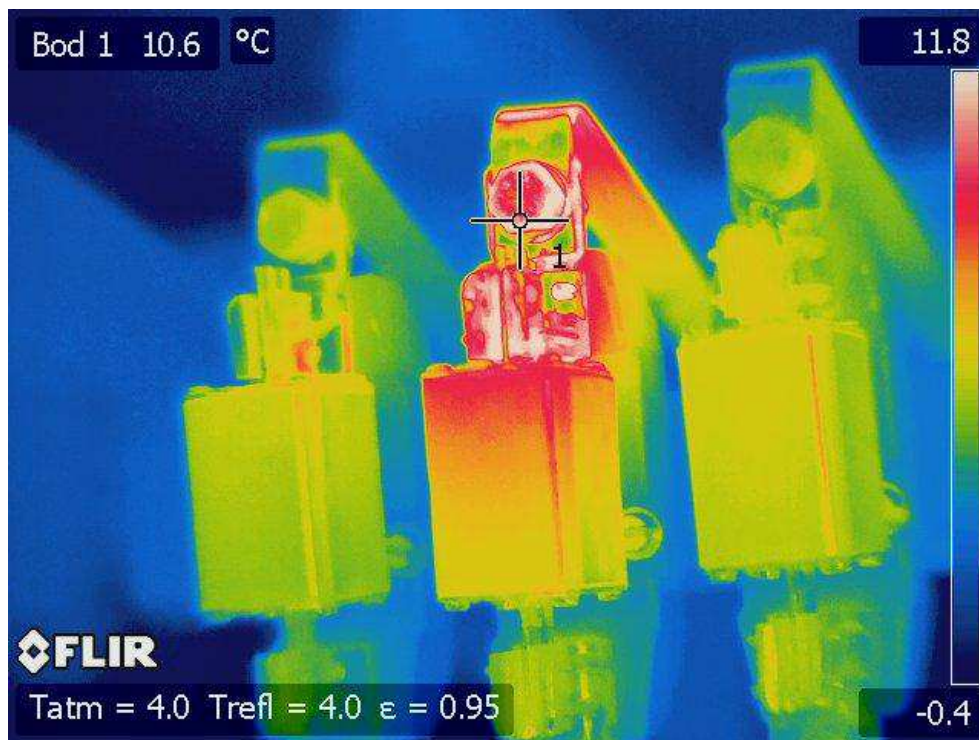
Snížený izolační odpor

Snížený izolační odpor souvisí především se stářím izolačního systému. Při dlouhodobém tepelném a elektrickém namáhání postupně klesá stav izolačního odporu. Dalšími faktory jsou především hodnota krytí elektrického stroje před vniknutím cizích těles a před vnikem vzdušné vlhkosti. Výrazně lze omezit vliv vlhkosti na izolační systém impregnací celého rotoru. Díky impregnační vrstvě lze zamezit navlhání daných izolací. Impregnace dále zajistí zafixování satorového vinutí, a tím zamezí jakémukoliv nechtěnému pohybu a případnému oděru laku vodičů. Při poklesu izolačního odporu pod hodnotu elektrické pevnosti v daném místě nastává zkrat na kostru případně na některou část vinutí.

Zvýšený přechodový odpor

Počet paralelních větví, počet vývodů a u strojů s profilovými vodiči počet cívek jsou faktory, které ovlivňují počet spojů elektrických částí. Každý jednotlivý spoj je velmi důležitý pro správnou funkci motoru. Ať už je spoj vytvořen technologií lisování, svařování, nebo pájením, je třeba zajistit co nejvyšší kvalitu tohoto spojení. V nekvalitním spoji nastává velký úbytek napětí, tím pádem vznikají tepelné ztráty. V závislosti na závažnosti poruchy může nastat předčasná degradace izolace v blízkosti tohoto stroje, čímž pádem může nastat například zkrat mezi fázemi. V jiném případě při vysoké teplotě spoje může dojít až k přetavení tohoto místa. Pro spoje ve strojích jsou používány technologie především svařování plamem na čelech vinutí a lisování koncovek pro šroubové spojení v prostoru svorkovnice.

Pro kontrolu kvality spojů je možné využít termovizi, díky které lze dohledat místo případné poruchy. Na obrázku číslo 1 je možné vidět příklad vadného kontaktu u nožové pojistky.



Obr. 1: Teplotní pole u přechodového odporu kontaktu

Poškození rotorové tyče

Vznik poruchy u rotoru je především závislý na konstrukci a na technologii výroby rotorové klece.

Rotory s měděnou klecí na krátko jsou tvořeny profilovými vodiči ve tvaru rotorové drážky, které jsou na koncích navařeny ke kruhu nakrátko. U takového rotoru může prasknout spoj mezi rotorovou tyčí a kruhem nakrátko.

U lité klece z hliníku může dojít k prasknutí rotorové tyče. Další porucha může vzniknout už při procesu lití hliníku v samotné výrobě. Při nesprávném dodržení požadovaných parametrů a to především teploty hliníku před odlitím a nízkým plnicím tlakem. Při nedodržení těchto parametrů nemusí být rotor zcela odlit. Tento problém se týká především rotorů s malým poměrem průřezu rotorových drážek k celkové délce rotorového paketu. Dále se tento problém může vyskytnout u dvojitých rotorových drážek, které jsou propojeny krčkem. Při prolívání teče hliník rychleji drážkou s vyšším průřezem, pokud tvar krčku je dlouhý a úzký, hliník může ztuhnout dříve, než dojde ke kompletnímu prolití celé drážky.



Obr. 2: Nedolitý rotor po částečném obrobení (pohled na rozběhovou klec)

Hřídelové napětí

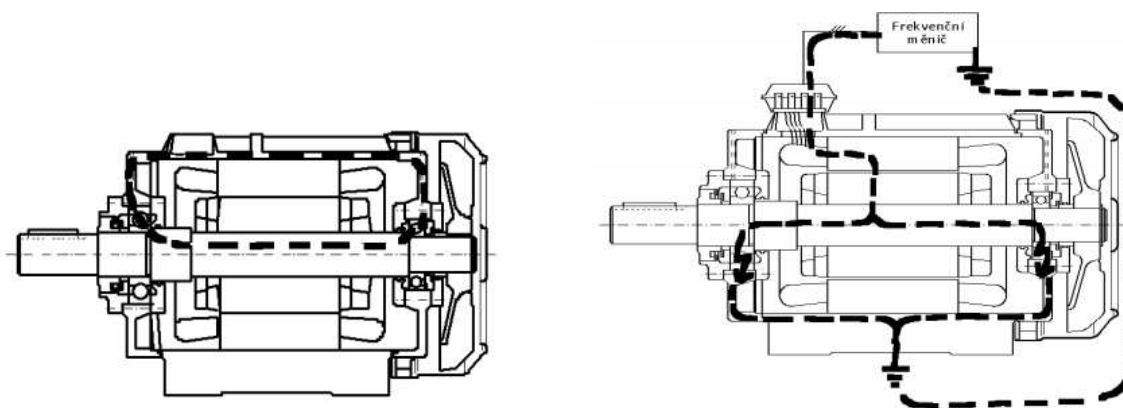
Přítomnost hřídelového napětí u točivých strojů je nežádoucí stav, který může výrazně zkrátit životnost ložiskových uzlů. Tento stav vzniká v důsledku časové nebo prostorové nesymetrie magnetického toku ve stroji. Faktory ovlivňující přítomnost a velikost hřídelových napětí jsou především způsob napájení motoru, přesnost výroby a v neposlední řadě konstrukční návrh stroje.

Při návrhu asynchronního stroje je třeba použít anizotropní elektrotechnický plech, který má ve všech směrech stejné magnetické vlastnosti. Jelikož za tepla válcované plechy tuto vlastnost nemají dokonalou, je třeba při sestavování magnetických obvodů plechy postupně otáčet. V ideálním případě by měl být každý plech pootočen o rozteč mezi dvěma drážkami. Z technologických, časových a ekonomických důvodů je ale výhodnější pootáčet pouze skupiny plechů o 90° . Pootáčením plechů lze také velmi efektivně eliminovat výrobu prohnutých magnetických obvodů. Jelikož tyto magnetické obvody jsou poskládány z několika stovek plechových částí, i nepatrná odchylka v tloušťce plechu hraje velkou roli. Při pootáčení plechů se tato odchylka postupně střídá vždy po 90° , takže výsledný tvar se blíží dokonalému válci.

Vliv přesnosti výroby je především v dodržení rovnoměrné vzduchové mezery po celém jejím obvodu. Hřídelové napětí je také velmi ovlivněno druhem a kvalitou elektrického napájení motoru. Při nesymetrickém síťovém napětí vzniká také nesymetrický magnetický tok, který má za následek přítomnost hřídelového napětí. Další příčinou může být způsob napájení přes frekvenční měnič. Jelikož frekvenční měnič generuje pulsy s vysokou strmostí náběžné hrany, elektrická energie se začne uzavírat kapacitní cestou.

Samotné hřídelové napětí ještě nemusí nutně způsobovat degradaci ložisek. Při běžném provozu stroje je totiž na valících se elementech ložisek velmi tenká vrstva maziva, která dokáže elektricky izolovat oba kroužky tohoto uzlu. Přítomnost ložiskových proudů tedy ještě závisí na samotném průběhu hřídelového napětí. Vzniku ložiskových proudů lze předcházet především různými způsoby izolace ložisek, případně izolací celého ložiskového štítu.

Rozlišujeme dvě varianty ložiskových proudů. Při časové a prostorové nesymetrii magnetického toku se proud uzavírá pouze uvnitř motoru přes hřídel, ložiska a kostru viz obrázek číslo 3. V případě motoru napájeného frekvenčním měničem se proud uzavírá i vně motoru přes elektrické uzemnění stroje a měniče kmitočtu.



Obr. 3: Ložiskové proudy [8]

1.3 Porucha mechanické části

Poškození ložisek

Poškození ložisek je jedna z nejčastějších poruch asynchronního stroje. S výjimkou těsnění je to jediná část motoru, která je degradována pomocí mechanického tření. V asynchronních motorech v závislosti na velikosti rotorů jsou použity kuličková, válečková, nebo kluzná ložiska. Všechna tato ložiska potřebují pro správnou funkci použití vhodného maziva. Faktory ovlivňující správnou funkci a délku životnosti ložiskových uzlů jsou především kvalita maziva, výskyt ložiskových proudů, správnost ustavení stroje vůči poháněnému zařízení a vůči navržené montážní pozici stroje. Dalším faktorem ovlivňující životnost je případné axiální namáhání ložisek u strojů, které na to nejsou konstruovány. Například na motor konstrukce IMB3 nelze bez dalších opatření provozovat axiální ventilátor. Tento ventilátor totiž působí silou na hřídel v axiálním směru, na kterou obvykle motor není dimenzován. Poškození ložisek se projevuje zvýšenými vibracemi celého stroje, zvýšeným oteplením.

Při vypnutém stroji a odpojení od zátěže je také pocítit zvýšený odpor při protáčení rotoru rukou. Při úplné destrukci ložiska již nejde hřídeli otočit vůbec. Ložisko poškozené ložiskovými proudy má na vnějším kroužku strukturu připomínající tvar žebříku.



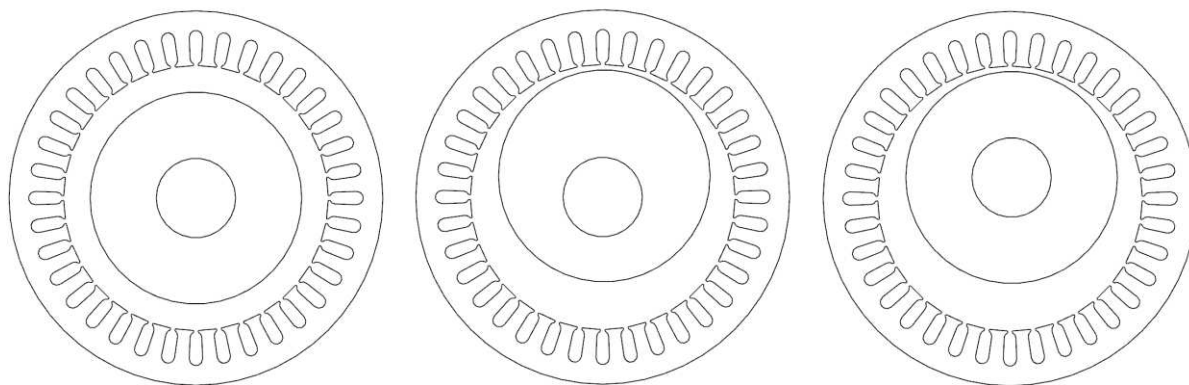
Obr. 4: Vnější kroužek kuličkového ložiska narušený ložiskovými proudy

Excentricita rotoru

Excentricitu rotoru, respektive hřídele se může v točivých strojích vyskytnout ve dvou druzích popřípadě jejich kombinací. Jedním druhem je statická excentricita, která je způsobena vyosením rotoru vůči statoru. Druhou variantou je dynamická excentricita, která je způsobena prohnutou hřídelí. V praxi může nastat stav, kdy budou tyto poruchy současně.

Statická excentricita je způsobena nepřesným uložením rotoru do osy statoru. Tato vada může být zapříčiněna nepřesností výroby nebo vadným ustavením motoru. Pokud motor s patkovým uchycením není ustaven na rovný základ, při dotažení šroubů patek se kostra motoru deformuje a vzniká nerovnoměrnost vzduchové mezery. Dynamická excentricita může být způsobena prohnutím hřídele, nedostatečným vyvážením, nebo nedostatečnou tuhostí hřídele, která se může při vysokých otáčkách nepatrně vychylovat

Na obrázku č.5 je možné vidět postupně z levé strany rotor nevykazující excentricitu. Uprostřed vykazující dynamickou excentricitu, a vpravo rotor se statickou excentricitou. Statická excentricita může být dále rozdělena na rovnoběžnou a mimoběžnou.



Obr. 5: Druhy excentricit

Prasklá hřídel

Poškození tohoto typu je obvykle spojeno s výrobní vadou materiálu použitého při výrobě hřídele. Se zvyšujícími se nároky na kontrolu vstupních materiálů se takové poruchy téměř nevyskytují. Může se jednat například o částečné prasknutí v oblasti drážky pro pero. Hřídel také může prasknout při použití nepružné spojky mezi motorem a poháněným mechanismem, pokud není zajištěná souosost těchto dvou zařízení.

Důležitou součástí většiny motoru je také chladicí ventilátor. Jedná se o nezbytnou součást motoru, která při poškození výrazně ovlivňuje životnost točivého stroje. Ventilátory mohou být buď kovové, nebo nekovové. Ventilátory z nekovových materiálů například z plastů, mohou být při vniknutí cizího tělesa do krytu ventilátoru buď částečně, nebo úplně zničeny. Ventilátory litinové, nebo svařené z plechů bývají velmi odolné ale také více hlučné. Pro zajištění potřebného množství vzduchu je třeba ventilátoru, který není nijak poškozen, nebo deformován.

Poškozená kostra

Poškození kostry souvisí s nesprávným ustavením motoru nebo s výrobní vadou dané kostry. Přesnost ustavení motoru na rovný základ je základním požadavkem pro patkový motor typu IMB3. Pokud motor nemá ustavené patky do jedné roviny, při dotažení šroubů k tuhému základu dojde ke zpříčení kostry. Pokud je nerovnost základu velká, může dojít k částečnému naprasknutí patky, po případě může být patka nebo i kostra úplně zlomena.

1.4 Metody diagnostiky poruch asynchronních motorů

Technická diagnostika je souhrn činností vykonávaný za účelem stanovení aktuálního technického stavu zařízení. Úlohou technické diagnostiky je hodnocení aktuálního stavu objektu na základě objektivního vyhodnocení výsledků měření, a vlastností zařízení v provozu.

Při zjišťování poruchy zařízení je snahou použít takové metody, při kterých není třeba omezovat provoz daného zařízení. Je to dáno tím, že motory jsou obvykle nezbytnou součástí komplexního zařízení. V takových případech jsou odstávky pohonných jednotek nežádoucí a nesou sebou celou řadu problémů. V takových případech je vhodné využít online diagnostiky, při které lze poruchy zjišťovat na zařízení, které je v běžném provozu. Je zde možné použít měření statorových proudů, se kterými lze například zjistit statickou excentricitu rotoru, dynamickou excentricitu rotoru a porušenou rotorovou klec. Pomocí vibrací může taktéž zjistit poruchy rotoru, dále také můžeme odhalit problémy s ložisky, nebo nesprávné ustavení stroje vůči poháněnému mechanismu. Pomocí teploměru nebo termovize lze zjistit problémy u ložiskových uzlů, které se při nesprávné funkci nadměrně zahřívají.

Pokud je motor možné odpojit od zdroje elektrické energie, můžeme dále zjišťovat například elektrický odpor jednotlivých vinutí, izolační odpor vinutí vůči kostře a test rázovou vlnou.

Další přesná měření lze provádět obvykle na speciálních zkušebnách. Měření v místě provozu motoru nemusí být vždy objektivní. Například měření vibrací, hluků může být ovlivněno poháněným zařízením popřípadě dalšími motory v blízkosti měřeného zařízení. Měření statorových proudů může být ovlivněno nesymetrickým odběrem v blízkosti asynchronního motoru, což může být také možná příčina nesprávného provozu stroje. Na zkušebně je dále možno měření momentové charakteristiky, napětí nakrátko a dalších měření, které by se měly shodovat s výsledky z typové zkoušky daného produktu.

Diagnosticke metody, které je možné v praxi aplikovat na sledování stavu izolačního systému můžeme rozdělit z hlediska jejich působení na nedestruktivní a destruktivní. Destruktivní metody jsou takové, při kterých jsou výsledky získané za cenu trvalého poškození zkoumaného objektu. Přitom poškození nemusí být tak velké, aby zkoumaný objekt nebyl schopný dalšího provozu ihned po vykonání zkoušky. Za destruktivní zkoušku považujeme i takovou metodu, která vyvolá výrazné urychlení degradačního procesu. Nedestruktivní metody jsou takové, které je možné libovolně často opakovat bez toho, aby zkoušený objekt vykazoval znatelné trvalé změny způsobené samotnou zkouškou. Nedestruktivní zkoušky dávají všeobecný obraz o stavu izolace jako celku. [6]

Provozní diagnostika

Veličiny pro diagnostiku jsou generovány samotným strojem. Výhodou této varianty je možnost zjišťování aktuálního stavu zařízení při jeho provozu. Tento druh technické diagnostiky bude použit v následujícím měření.

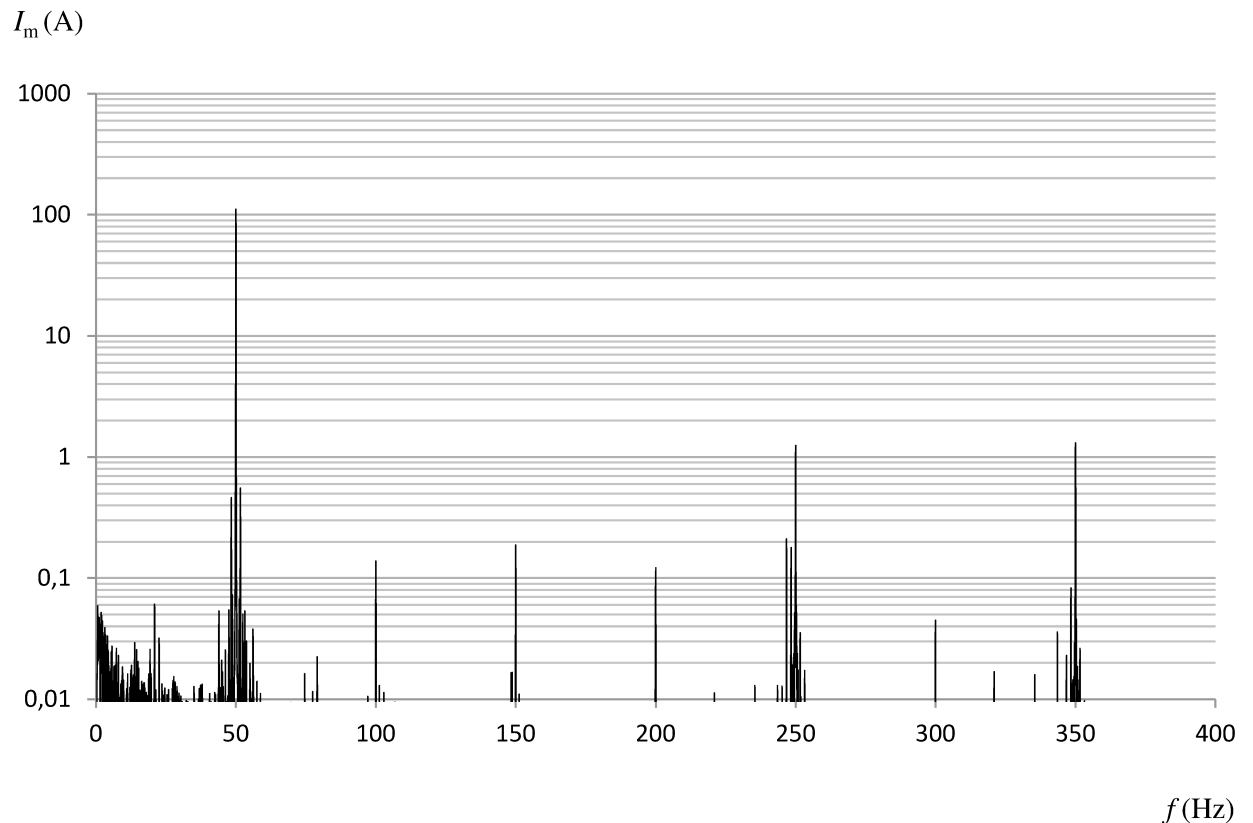
Testovací diagnostika

Veličiny pro tuto metodu jsou generovány diagnostickými zařízeními. Nevýhodou této metody je nutnost vyřazení stroje z běžného provozu. Pomocí této metody lze například zjistit mezizávitový zkrat. Pomocí generátoru rázové vlny a osciloskopu se porovná odezva na signál ve všech třech fázích. Vinutí postižené zkratem mezi závitů poté vykazuje odchylku vůči ostatním cívkám.

2.0 Rozbor frekvenční analýzy a aplikace

Z rozboru frekvenčních spekter proudů a vibrací generovaných motory za jejich běžného provozu lze usoudit na poruchy i nesymetrii elektrického a magnetického obvodu stroje. Dále je možné touto metodou zjistit vadu mechanických částí. Jedná se o funkční diagnostiku, takže není třeba generování testovacího signálu. Měřený signál generuje samotné měřené zařízení v podobě satorového proudu a vibrací celého stroje. Tato metoda je prováděna při napájení zařízení harmonickým elektrickým proudem. Jelikož mechanická oscilace stroje mohou být způsobena nesprávnou funkcí aktivních částí daného stroje, doporučuje se použít doplňkovou diagnostickou metodu měření vibrací. Pro hodnocení stavu analyzovaného stroje porovnávají v proudovém spektru amplitudy první harmonické s amplitudami ostatních frekvencí. Pokud je rozdíl mezi amplitudami první harmonické a další frekvencí menší než 40dB, může to naznačovat zhoršené parametry daného zařízení. Na takovém zařízení by mělo tedy dojít ke kontrole celkového technického stavu. [7]

Jako příklad si uvedeme proudové spektrum motoru o výkonu $P_n=45\text{kW}$ provozovaný na jmenovité parametry. U tohoto motoru jsou částečně poškozeny 3 rotorové tyče. Jak je z obrázku číslo 6 patrné, dominantní frekvencí je průmyslový kmitočet $f=50\text{Hz}$ a hodnotou amplitudy $I_m=111\text{A}$. Postranní pásma o frekvenci $f=48,375\text{Hz}$ ($I_m=0,46\text{A}$) a $f=51,625\text{Hz}$ ($I_m=0,55\text{A}$) značí nesymetrii magnetického toku. Tato vada je zapříčiněna nesymetrickou reakcí kotvy, která ovlivňuje magnetický tok vzduchovou mezerou. Rozdíl amplitud průmyslové frekvence $f=50\text{Hz}$ a frekvence postranního pásma $f=51,625\text{Hz}$ ($I_m=0,55\text{A}$) odpovídá 46dB. Tato hodnota naznačuje, že stroj může mít částečnou poruchu v rotorovém obvodu. Další podrobnosti k měření postranních pásem jsou rozebrány v kapitolách č. 3 a č.4, které jsou zaměřeny na praktické měření. Složka o frekvenci $f=100\text{Hz}$ a amplitudě $I_m=0,14\text{A}$ je dána nepatrnou statickou excentricitou rotoru. Dále je ve spektru proudu možné vidět složku o frekvenci $f=150\text{Hz}$ a amplitudě $I_m=0,19\text{A}$. Tato složka je přítomna z důvodu nepatrné nesymetrie satorového vinutí stroje. Ve spektru je také možné vidět pátou a sedmou harmonickou, $f=250\text{Hz}$ ($I_m=1,25\text{A}$) a $f=350\text{Hz}$ ($I_m=1,31\text{A}$). Tyto frekvence souvisejí s diskretním rozložením vinutí do drážek a změnou vodivosti vzduchové mezery vlivem drážkování satoru a rotoru. Jelikož jsou amplitudy postranních pásem vůči amplitudě základní harmonické velmi malé, je třeba pro znázornění použít logaritmické měřítko

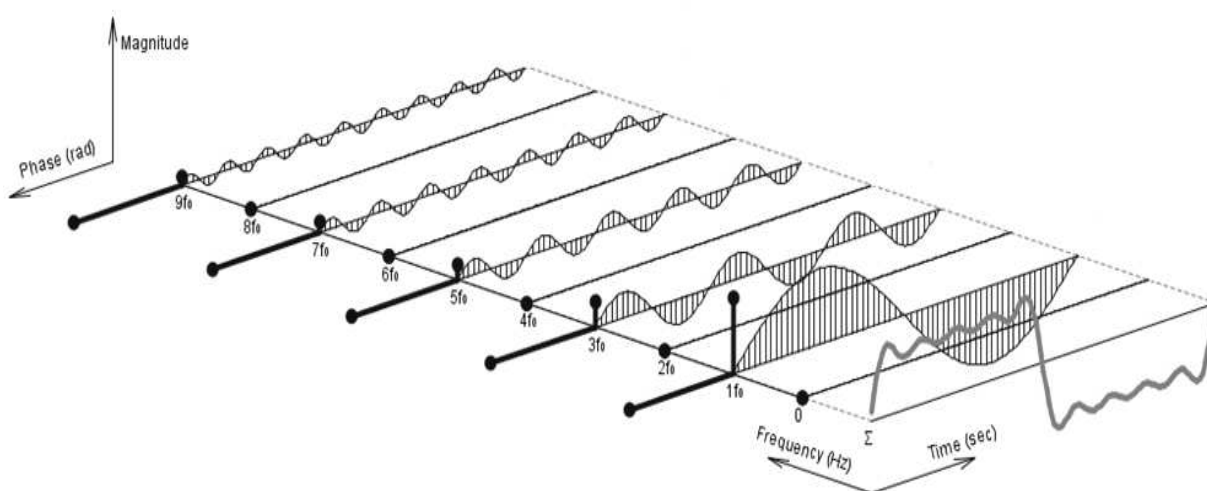


Obr. 6: Frekvenční spektrum proudu u motoru s poruchou rotoru

Zobrazení ve frekvenční oblasti se nazývá spektrem nebo také periodogramem. Vztah mezi časovou a frekvenční oblastí je popsán pomocí Fourierovy transformace (FT), při které se signál vyjádří jako lineární dekompozice harmonických průběhů. Protože však pracujeme se vzorkovaným signálem, používáme diskrétní Fourierovu transformaci (DFT). Zrychlení výpočtů nám přináší efektivní algoritmy výpočtu DFT, které nazýváme rychlou Fourierovou transformací (FFT). [4]

2.1 FT

Fourierova transformace převádí signál mezi z časově a frekvenčně závislým vyjádřením pomocí harmonických signálů sinus a cosinus. Jako příklad si uvedeme signál obdélníkového průběhu. Takového střídavého průběhu lze dosáhnout součtem lichých násobků základní harmonické, při stejném fázovém posuvu a při určitých hodnotách amplitud. Signál se bude tím více blížit obdélníkovému signálu, čím více bude použito pro výpočet signálů vyšších harmonických.



Obr. 7: Fourierova transformace obdélníkového signálu [10]

Průběh signálu se obvykle znázorňuje v čase, jinak řečeno v časové oblasti - doméně. Posuzování časového průběhu signálu vhodně doplňují i jeho vlastnosti prezentované rozkladem na soubor elementárních funkcí. Nejpřirozenější pro technické aplikace nejen v oboru kmitání mechanických systémů je rozklad na soubor harmonických funkcí, které se liší amplitudou, úhlovou frekvencí a svou počáteční fází. Jestliže se u souboru harmonických signálů znázorní závislost amplitudy a počáteční fáze na frekvenci, pak je signál znázorněn ve frekvenční oblasti - doméně. Rozklad periodické funkce se spojitým časem na kombinaci harmonických signálů se nazývá Fourierova (nekonečná) řada. Pro obecné neperiodické funkce se používá Fourierova transformace. Rozklad na Fourierovu řadu se týká jen periodických signálů. Přestože počet složek rozkladu je obecně nekonečný, obsahuje tento rozklad jen složky s frekvencemi, které jsou násobky, tzv. harmonické, základní frekvence opakování signálu. To znamená, že spektrum obsahuje jen izolované složky. Rozklad obecného, tj. nejen periodického signálu, ale také neperiodického signálu na harmonické složky, lze vypočítat s pomocí Fourierovy transformace. Příkladem neperiodického signálu je osamocený obdélníkový impuls nebo také jakákoliv jiná neperiodická funkce. Tento rozklad obsahuje obecně složky o všech frekvencích s nekonečně malou amplitudou. Spektrum je spojitá funkce frekvence. [4]

2.2 Aplikace frekvenční analýzy

Pomocí frekvenční analýzy lze v asynchronním motoru odhalit několik vad. Jedná se především o vady týkající se ložiskových uzlů, nesprávného ustavení motorů vůči poháněnému zařízení a především vady týkající se rotoru.

Statická excentricita

U statické excentricity je šířka vzduchové mezery závislá jenom na poloze rotoru a není tedy časově proměnná. Na tomto základě lze vyvodit, že magnetické pole ve vzduchové mezeře se točí úhlovou rychlostí, která je dána frekvencí napájecí sítě a počtem pólových dvojic. Statická excentricita je definována jako vyosení osy rotoru v místě, kde je mezera menší, dochází k silnější interakci statorového a rotorového magnetického pole. Vliv statického vyosení se projeví jako vznik postranních pásem, které jsou posunuty od síťové frekvence o synchronní otáčkovou frekvenci. [8]

$$f_p = f_1 \pm \frac{f_1}{p} = 50 + \frac{50}{2} = 75 \text{ (Hz)}$$

$$f_p = 50 - \frac{50}{2} = 25 \text{ (Hz)}$$

Statická excentricita se taky projeví ve frekvenčním spektru na dvojnásobku základní harmonické.

$$f_p = 2 \cdot f_1 = 2 \cdot 50 = 100 \text{ (Hz)}$$

Dynamická excentricita

Dynamická excentricita je zapříčiněna poruchou rotoru. Poměry jsou složitější než u statické excentricity. Šířka je totiž funkcí jak polohy, tak i času. Dynamická excentricita se projeví vznikem postranních pásem, které jsou posunuty od základní harmonické o frekvenci rotoru.

$$f_{p+} = f_1 \pm (1 - s) \cdot \frac{f_1}{2} = 50 + (1 - 1,864 \cdot 10^{-2}) \cdot \frac{50}{2} = 74,53 \text{ (Hz)}$$

$$f_{p-} = 50 - (1 - 1,864 \cdot 10^{-2}) \cdot \frac{50}{2} = 25,47 \text{ (Hz)}$$

Ustavení stroje

Velmi častou závadou je nesprávné ustavení motoru vůči poháněnému zařízení. Nesprávné ustavení zpravidla způsobuje nesouosost. Nesouosost vyvolává při spojení stroje s poháněným zařízením deformační a třecí síly, které mohou deformovat jak ložiskový uzel, tak samotnou kostru motoru. V takovém případě bývají v proudovém spektru postranní pásma o následující frekvenci.

$$f_{p+} = f_1 \pm \left(\frac{n}{60} + s \cdot f_1 + v \cdot \frac{n}{60} \right) = 50 + \left(\frac{1472}{60} + 1,864 \cdot 10^{-2} \cdot 50 + 0 \cdot \frac{1472}{60} \right) = 75,47 \text{ (Hz)}$$

$$f_{p-} = 50 - \left(\frac{1472}{60} + 1,864 \cdot 10^{-2} \cdot 50 + 0 \cdot \frac{1472}{60} \right) = 24,53 \text{ (Hz)}$$

Drážkování statoru

$$f_{p+} = f_1 \left(\frac{Q_s}{p} \pm 1 \right) = 50 \cdot \left(\frac{48}{4} + 1 \right) = 1250 \text{ (Hz)}$$

$$f_{p-} = 50 \cdot \left(\frac{48}{4} - 1 \right) = 1150 \text{ (Hz)}$$

Drážkování rotoru

$$f_{p+} = \frac{f_1}{2} (1 - s)(Q_r \pm p) = \frac{50}{2} (1 - 1,864 \cdot 10^{-2})(36 + 2) = 932,3 \text{ (Hz)}$$

$$f_{p-} = \frac{50}{2} (1 - 1,864 \cdot 10^{-2})(36 - 2) = 834,2 \text{ (Hz)}$$

Poškození rotoru

Rotorová klec asynchronního motoru tvoří vícefázovou soustavu zapojenou do hvězdy, kde každá rotorová tyč tvoří jednu fázi. Napětí jednotlivých tyčí tvoří symetrickou fázovou hvězdicí, která vyvolává v kleci proudy, které tvoří symetrický vícefázový systém proudů. Při zvýšení rozdílném odporu několika fází dojde k narušení symetrie magnetického pole. Tato nesymetrie vyvolá deformaci magnetického pole ve vzduchové mezeře, čímž jsou ovlivněny především elektrické veličiny ve statorovém vinutí. Magnetické pole otáčející se ve vzduchové mezeře synchronními otáčkami vybudí ve statorovém vinutí proud, který se uzavírá přes zdroj elektrické energie. Ve frekvenčním proudovém spektru se tato porucha projeví jako postranní pásmo posunuté od základní frekvence, nebo od jejích harmonických dle následujícího vztahu. [7]

$$f_{p+} = |v * f_1 \pm 2 \cdot s \cdot f_1| = |1 \cdot 50 + 2 \cdot 1,864 \cdot 10^{-2} \cdot 50| = 51,8 \text{ (Hz)}$$

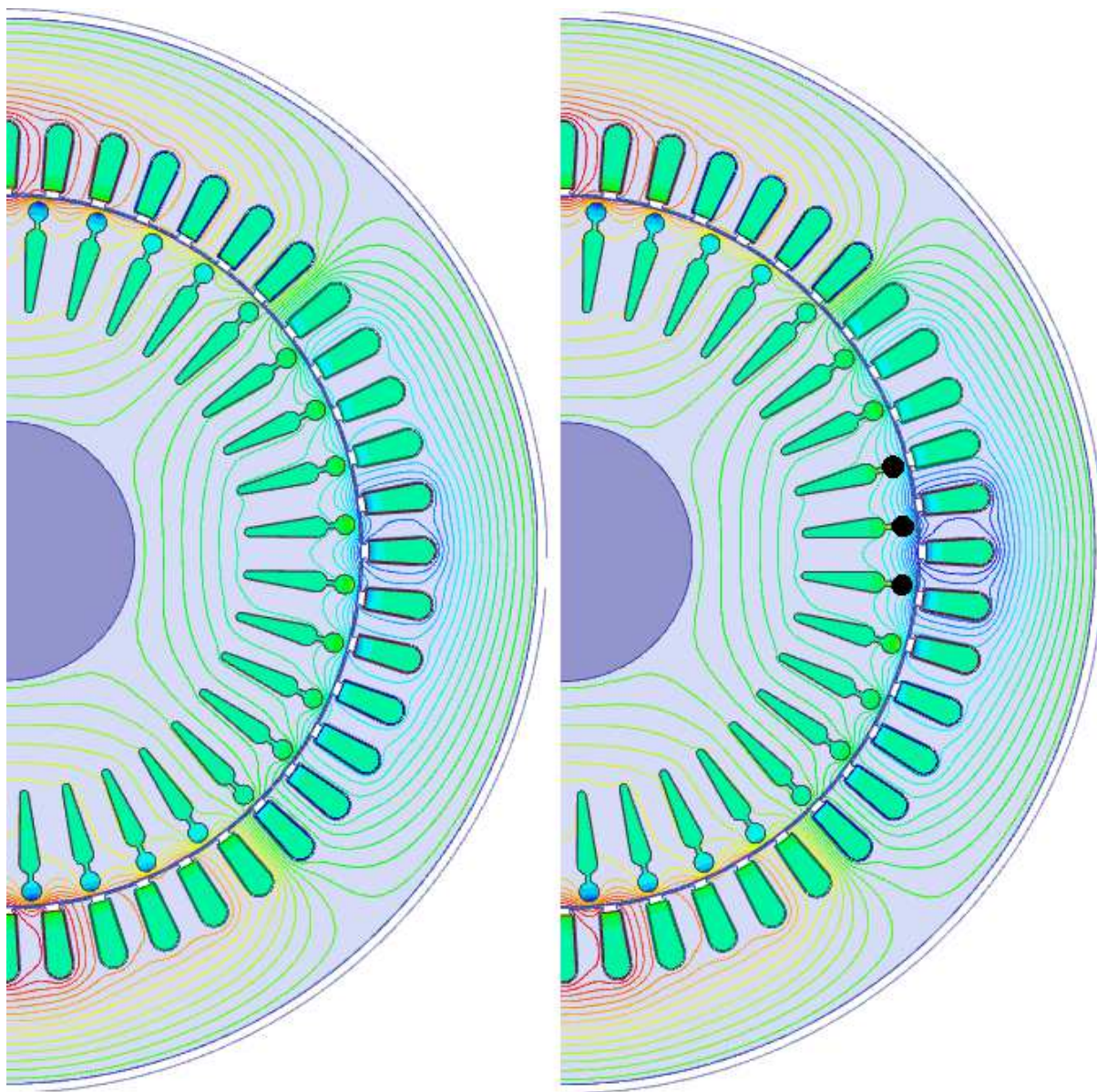
$$f_{p-} = |1 \cdot 50 - 2 \cdot 1,864 \cdot 10^{-2} \cdot 50| = 48,2 \text{ (Hz)}$$

2.3 MKP

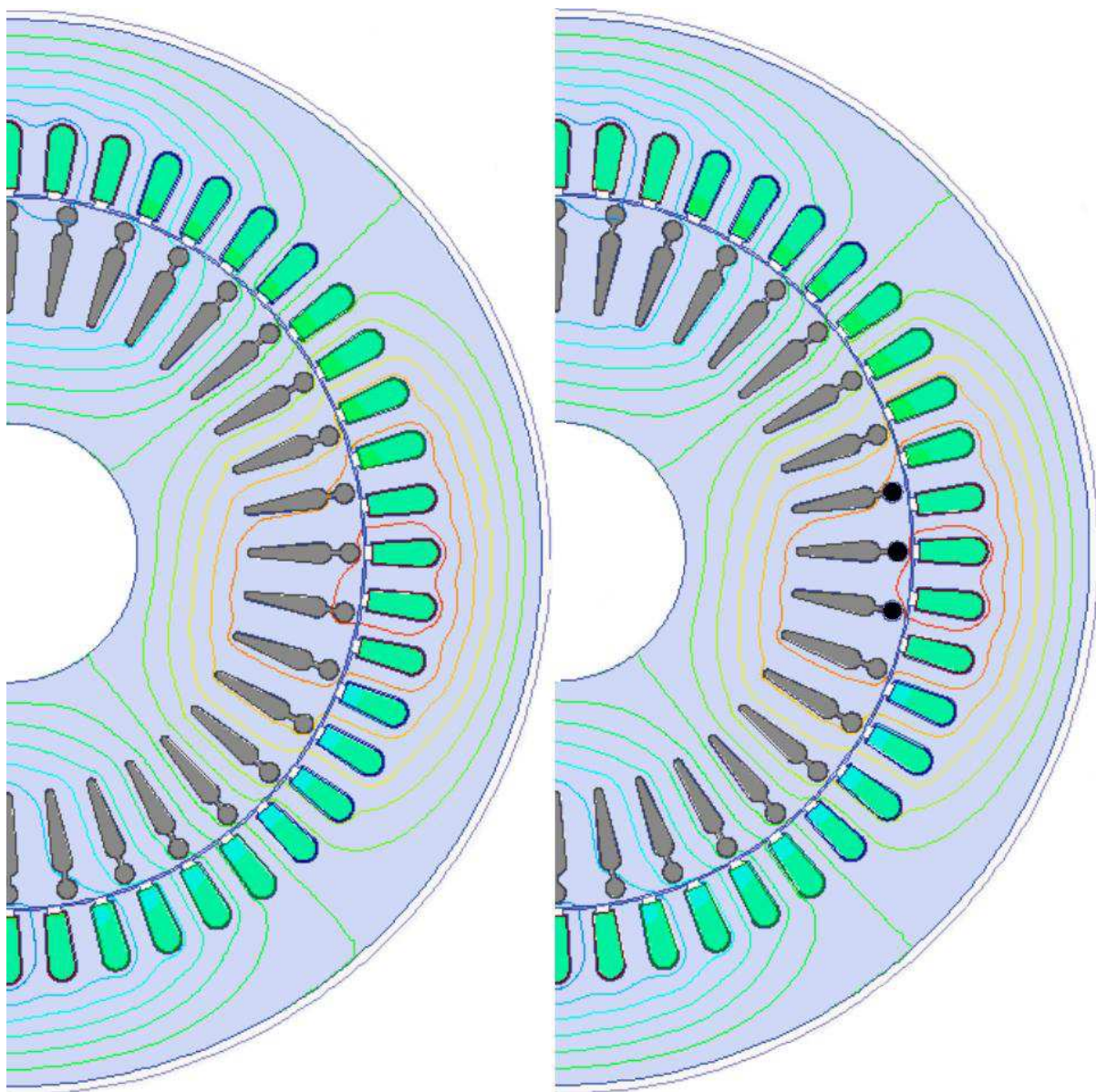
Při rozběhu asynchronního motoru se frekvence v kotvě f_2 rovná přibližně frekvenci f_1 , která je do statoru přivedena ze sítě (většinou 50Hz). Tato frekvence je dost velká, aby v tyčích rotoru, které jsou dobře elektricky vodivé, vytvořila vířivé proudy. Tyto proudy ale naruší rozložení proudové hustoty v tyčích. Proud je vytlačován k povrchu rotoru, tedy k vzduchové mezeře. Tento jev se nazývá skinefekt. Jelikož největší část proudu protéká jen částí tyče, tak se odpor tyče zvětšuje. Zatímco vliv nerovnoměrného rozložení proudové hustoty na reaktanci je opačný, ta se zmenší. [1]

Díky metodě konečných prvků můžeme přibližně zjistit rozložení daných veličin v prostoru stroje. Lze tak přibližně zjistit rozdíly parametrů u motoru bez poruchy a u motoru s částečně porušeným rotorem.

V následujících obrázcích číslo 8 a 9 je možné vidět řez aktivních částí asynchronního motoru s poruchou v rotorové kleci. V obou řezech jsou vyobrazeny pole magnetického toku. Jak je z obrázků patrné, rozdíl v hustotě magnetického toku v místě poruchy oproti rotoru bez vady je velmi malý. V obrázku číslo 8 je vyobrazen magnetický tok při jmenovitém stavu, v obrázku číslo 9 je vyobrazen záběrný stav motoru.



Obr. 8: Magnetický tok při jmenovitém provozním stavu motoru s poruchou rotoru



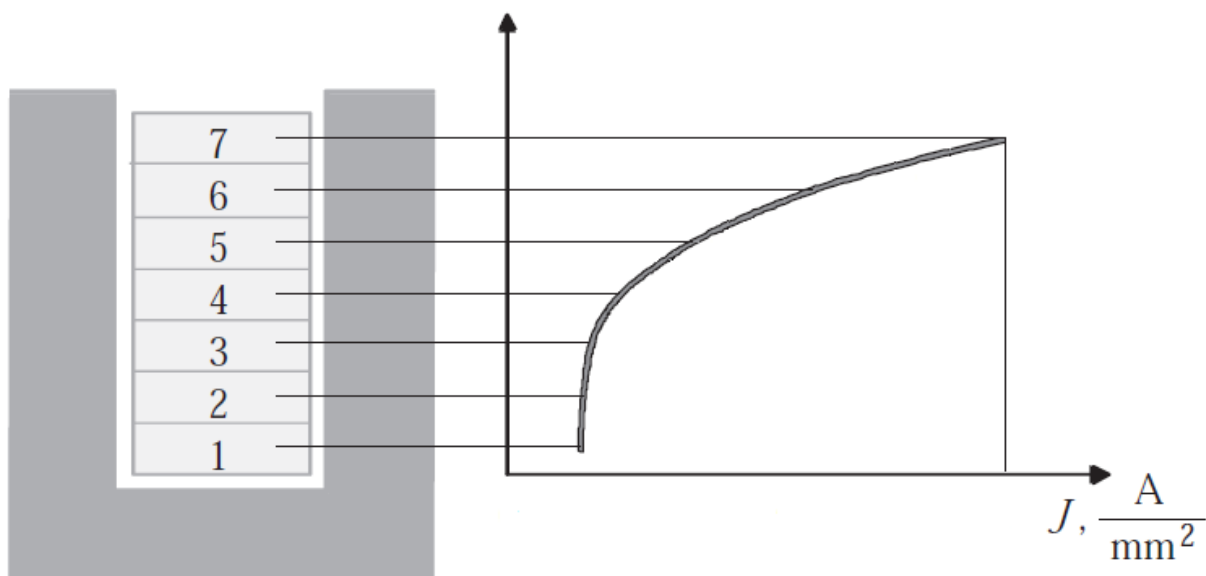
Obr. 9: Magnetický tok v záběrném stavu motoru s poruchou rotoru

Jako příklad si uvedeme asynchronní motor v pracovním bodě $s=1$, což znamená při záběrných hodnotách. V takovém stavu je frekvence rotoru

$$f_2 = f_1 * s = 50 * 1 = 50 \text{ (Hz)}$$

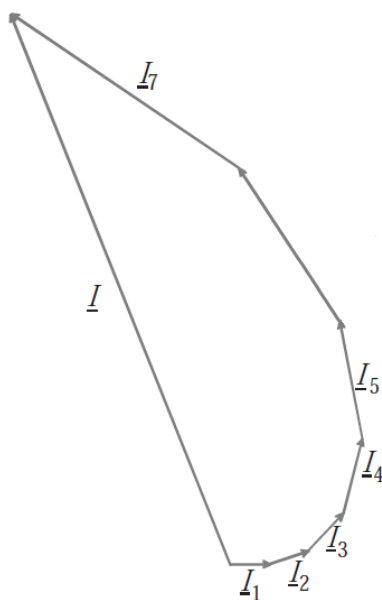
Pro zjednodušení si můžeme rotorovou tyč rozdělit na konečný počet vrstev. Při skinefektu klesá proudová hustota od povrchu vodiče přibližně podle exponenciály. Jak je možné vidět v obrázku číslo 10, proud tekoucí rotorovou klecí není konstantně rozložen po celém průřezu profilu. Při snižování skluzu a tím pádem i frekvence rotoru se vliv skinefetu postupně snižuje. Při skluzu blížíci

se hodnotě 1 je frekvence rotoru velmi malá, takže rozložení proudové hustoty v profilu je téměř konstantní.



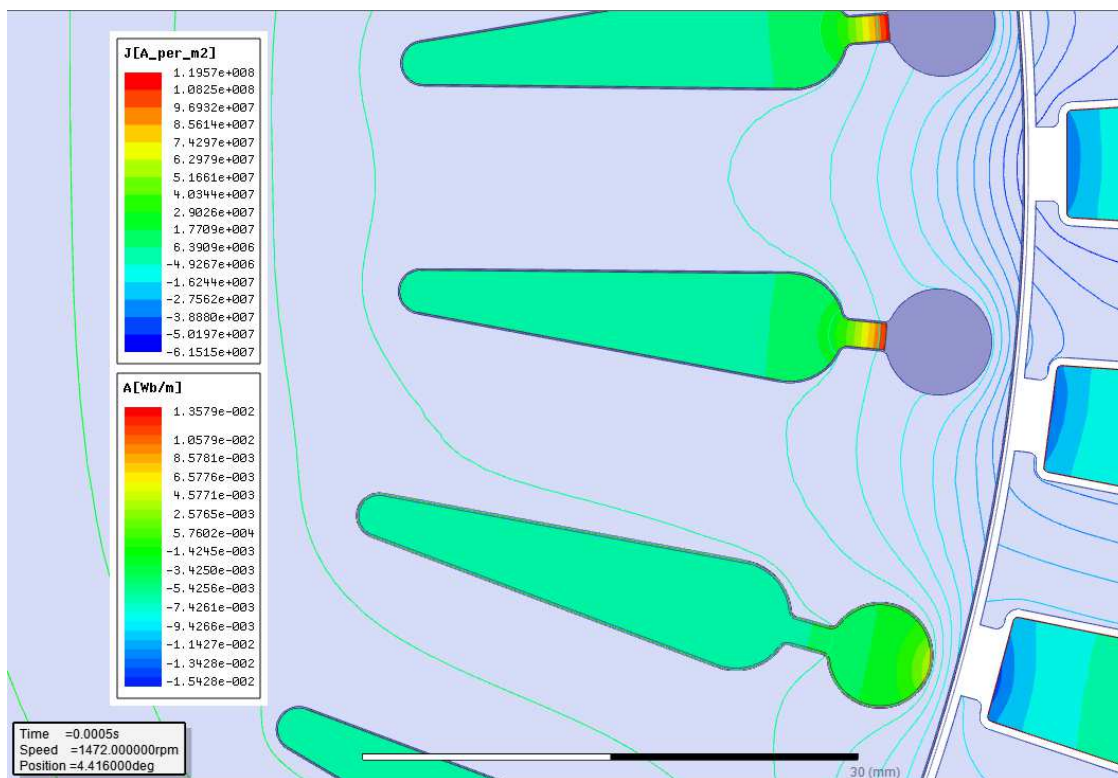
Obr. 10: Závislost proudové hustoty na hloubce rotorové drážky

V následujícím fázorovém diagramu (obrázek č.11) je možné vidět jednotlivé složky proudu tekoucím rotorovou tyčí. Vektorových součet proudů jednotlivých vrstev dává celkovou hodnotu rotorové tyče.



Obr. 11: Vektory proudů tekoucích rotorovou klecí

V následujícím obrázku je možné vidět pole proudové hustoty u rotoru s nedolitou rozběhovou klecí. Toto pole je vyobrazeno pro jmenovité zatížení motoru. V místě poškození, konkrétně v krčku mezi oběma krčky bude docházet k nadměrnému zahřívání z důvodu zvýšené proudové hustoty v tomto místě.



Obr. 12: Závislost proudové hustoty na hloubce rotorové drážky s poruchou

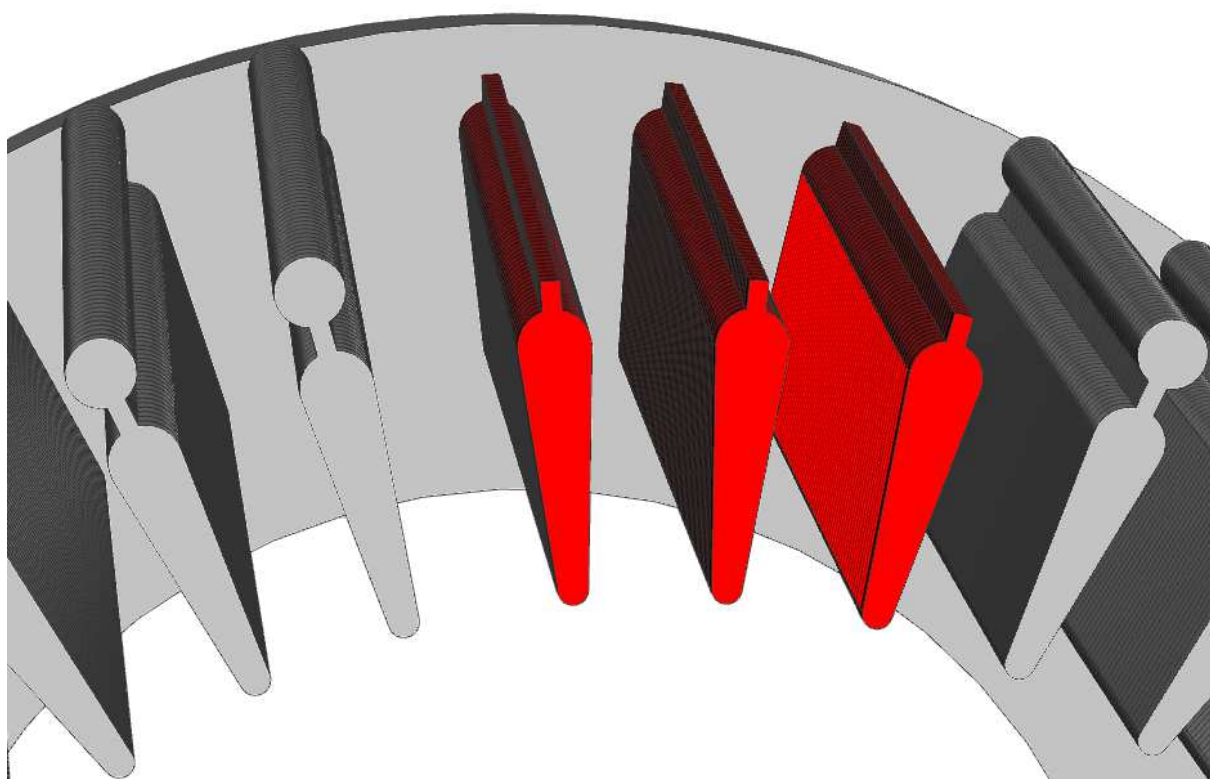
3.0 Měření na asynchronním motoru

3.1 Popis měření

Cílem měření bylo odhalení poruchy rotorové klece pomocí několika metod. Jednalo se především o frekvenční analýzu statorových proudů, měření záběrných proudů a měření vibrací. Měření probíhalo na hlavní zkušebně firmy Siemens s.r.o, o.z. Elektromotory Frenštát.

Pro měření byl použit čtyřpólový asynchronní motor řady 1LE1 osově výšky 225mm a se jmenovitým výkonem 45kW. Aby bylo možné s jistotou vyvodit závěr z měření, bylo třeba srovnání dvou vzorků motorů. Jeden standartní motor bez poruchy, a jeden motor, u kterého je známá a dobře zdokumentovaná vada. Nejvhodnější tedy bylo využít jeden motor a pro každé měření vyměnit pouze rotor. Tímto byly eliminovány jakékoliv odchylky ve výrobě statoru a případně ve stavu opotřebení ložisek.

Pro potřeby měření byl tedy vyroben rotor, u kterého nedošlo ke kompletnímu prolití rotorové klece. Před odlití klece hliníkem byly vloženy do třech drážek tyče ze sklotextitu a následně byly zajištěny teplu odolným tmelem. Zaslepena byla pouze vnější část drážky, která ovlivňuje především rozběhové vlastnosti asynchronního motoru. Nedolity byly teda konkrétně tři rozběhové tyče po celé délce. Vyrobená rotorová klec měla tedy tvar přibližný obrázku číslo 13. Další technologické postupy výroby hřídele, obrobení rotoru a dynamického vyvážení proběhlo standartním způsobem sériové výroby.



Obr. 13: Část modelu porušené rotorové klece

Nejprve bylo na hlavní zkušebně provedeno měření na standartním motoru vyrobeného sériovou výrobou. Po dokončení měření byl na motoru vyměněn rotor s hřídelí. Další komponenty zůstaly původní včetně ventilátoru a ložisek.

Na obou variantách motoru proběhlo měření typových zkoušek, měření záběrných proudů a záběrného momentu v závislosti na úhlu natočení rotoru, a v neposlední řadě frekvenční analýza proudů a vibrací při různých provozních stavech.



Obr. 14: Poškození rotoru před odlitím klece

Štítkové údaje pro motor 1LE15012BB234JB4 – Z. Pro účely měření bylo vinutí motoru zapojeno do trojúhelníku.

Tab. 1: Vybrané štítkové data

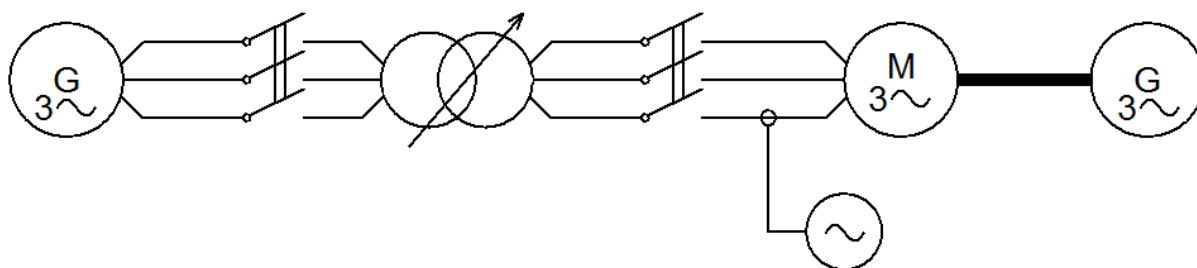
Osová výška	225
Krytí IP	55
Konstrukce	IMB35 (patko přírubová)
Tepelná třída izolačního systému	F
Třída účinnosti IEC	IE2

Tab. 2: Jmenovité hodnoty motoru

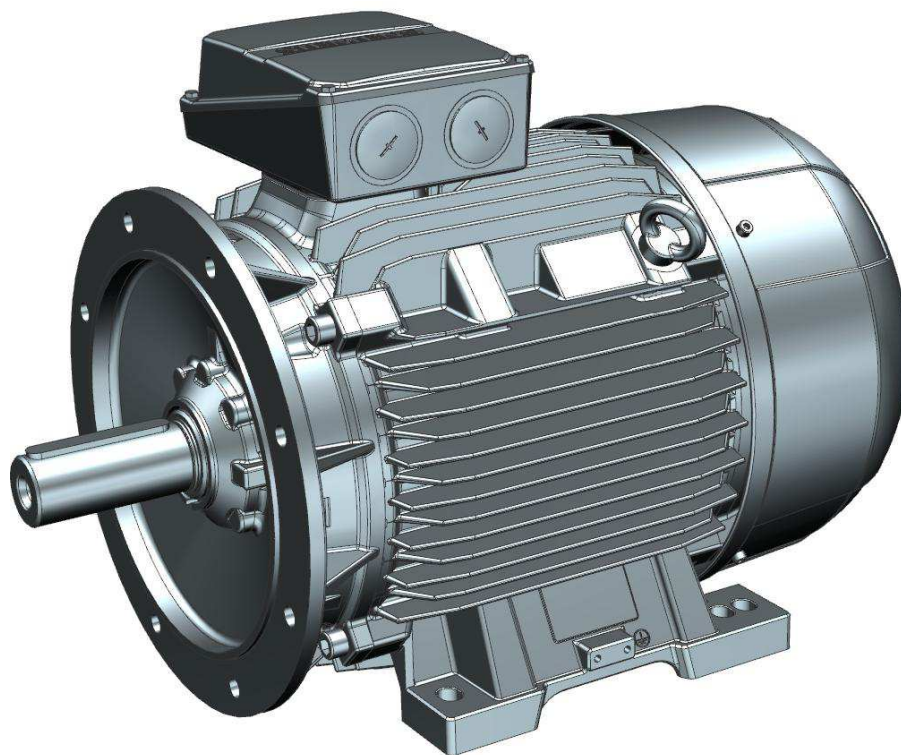
U (V)	F (Hz)	I (A)	P (kW)	φ (-)	η (%)	n (min ⁻¹)
400 Δ	50	80,0	45	0,87	93,1	1475
690 Y	50	46,5	45	0,87	93,1	1475
460 Δ	60	80,0	52	0,87	94,1	1775

Pro minimalizování chyby měření vnějšími faktory byl použit rotační zdroj elektrické energie. Větší část měření probíhalo na stanovišti, které umožnilo motor zatěžovat jak v momentové, tak v otáčkové prioritě. Na tomto stanovišti proběhla kompletní typová zkouška u obou variant motorů. Pomocí Rogowského cívky bylo možné zaznamenat časový signál potřebných veličin, které byly následně převedeny do frekvenčních spekter.

Veškeré zařízení potřebné k měření bylo zapojeno podle schématu na obrázku č.15 .



Obr. 15: Schéma zapojení měřicího přístroje



Obr. 16: Měřený motor Siemens 1LE1501-2BB2-34JB4

3.2 Frekvenční analýza statorového proudu

Při následujícím měření byl motor postupně zatížen na 50, 100 a 150% P_n . Jelikož tyto body leží v pracovní části momentové charakteristiky, mohl být motor zatížen s prioritou momentu. V jednom z dalších měření bude motor analyzován v rozmezí celé momentové charakteristiky, bude zatěžován s prioritou s otáčkovou prioritou. Měření bylo provedeno postupně na motoru bez poruchy a na rotoru s porušenou rotorovou klecí. Při každém z těchto pracovních bodů byl zaznamenán signál síťového proudu v časové oblasti o délce 16s. Díky tomuto záznamu bylo následně možné provést diskrétní Fourierovu Transformaci s frekvenčním rozlišením $df=0,0625$ (Hz). Měření bylo provedeno ve všech případech při jmenovitém napětí i frekvenci sítě.

Minimální délka záznamu

$$t_z = \frac{1}{0,0625} = 16 \text{ (s)}$$

Pracovní bod 50% P_n

Pro výpočet postranních pásem způsobené poruchou rotoru je nejprve třeba zjistit skluz rotoru v daném pracovním bodě. Dále je potřeba znát otáčky v daném pracovním bodě. V pracovním bodě při zatížení stroje na 50% P_n jsou naměřené otáčky 1489 (min^{-1}). Poté už lze snadno vypočítat skluz motoru.

Synchronní otáčky

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ (min}^{-1}\text{)}$$

Skluz motoru

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 = \frac{1500 - 1489}{1500} \cdot 100 = 0,733 \text{ (\%)}$$

Pomocí následujícího vztahu můžeme dopočítat frekvenci postranních pásem. Pro náš případ bude plně dostačující zjistit postranní pásma kolem první harmonické. Postranní pásma kolem vyšších harmonických budou prezentovány v kapitole č.4.

$$f_{p+} = |v \cdot f_1 \pm 2 \cdot s \cdot f_1| = |1 \cdot 50 \pm 2 \cdot 7,33 \cdot 10^{-3} \cdot 50| = 50,73 \text{ (Hz)}$$

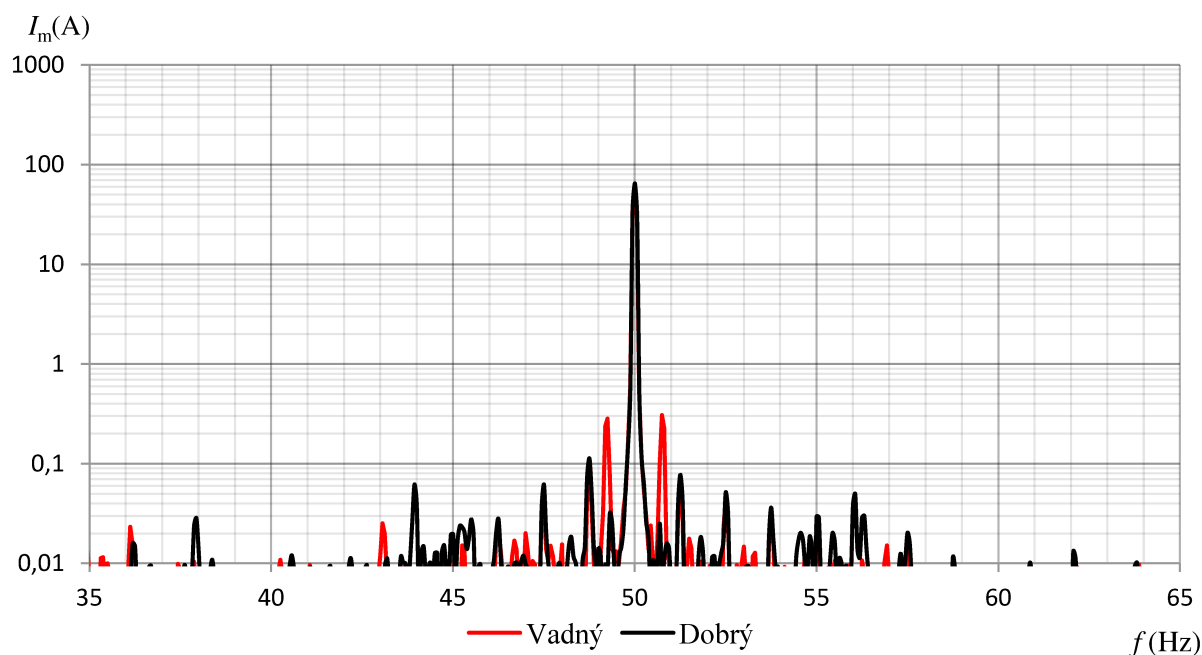
$$f_{p-} = |1 \cdot 50 - 2 \cdot 7,33 \cdot 10^{-3} \cdot 50| = 49,27 \text{ (Hz)}$$

Nepatrná odchylka mezi naměřenou a vypočtenou hodnotou postranních pásem je dána především vzorkovací frekvencí proudu. Dvojnásobná vzorkovací frekvence by prodloužila dobu měření na 32 (s). Takto dlouhá doba záznamu by zapříčinila velké oteplení motoru zejména při následujícím měření v oblasti celé momentové charakteristiky.

Pracovní bod 50% P_n

Tab. 3: Postranní pásma při 50% P_n

$P=50\% P_n$		$n=1489 \text{ (min}^{-1}\text{)}$		$s=0,733 \text{ (%)}$	
$f_1 \text{ (Hz)}$	$I_m \text{ (A)}$	$f_{p-} \text{ (Hz)}$	$I_m \text{ (A)}$	$f_{p+} \text{ (Hz)}$	$I_m \text{ (A)}$
50	63,4	49,25	0,28	50,75	0,31

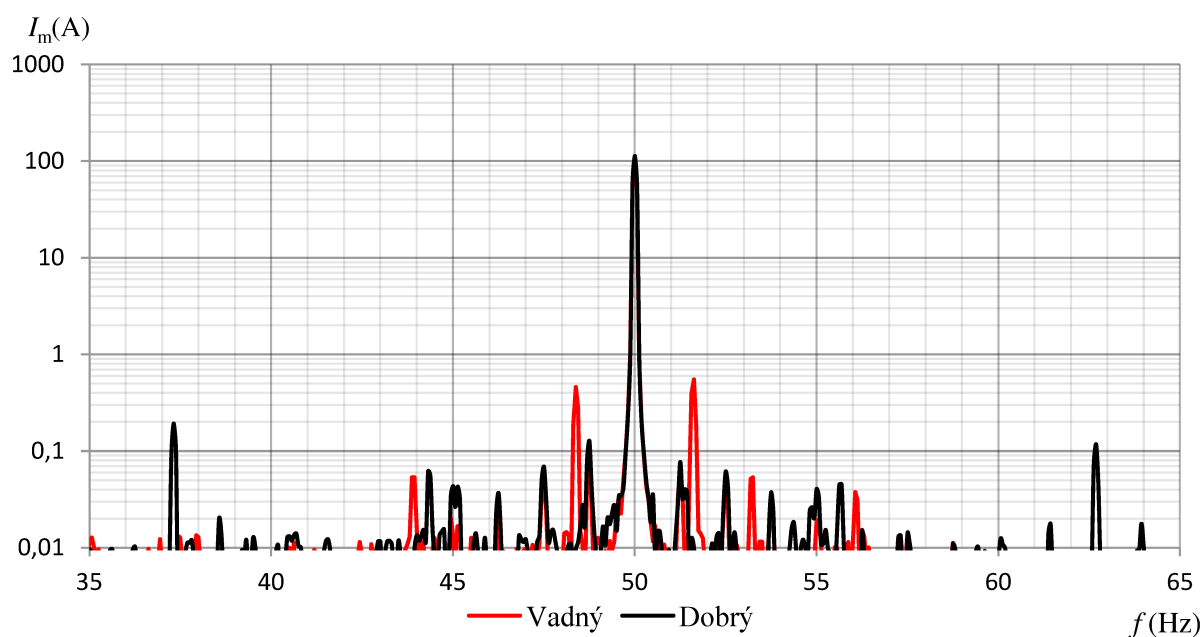


Obr. 17: Postranní pásma při 50% P_n

Pracovní bod P_n

Tab. 4: Postranní pásma při 100% P_n

$P= P_n$		$n=1475 \text{ (min}^{-1}\text{)}$		$s=1,67 \text{ (%)}$	
$f_1 \text{ (Hz)}$	$I_m \text{ (A)}$	$f_{p-} \text{ (Hz)}$	$I_m \text{ (A)}$	$f_{p+} \text{ (Hz)}$	$I_m \text{ (A)}$
50	111	48,375	0,461	51,625	0,554

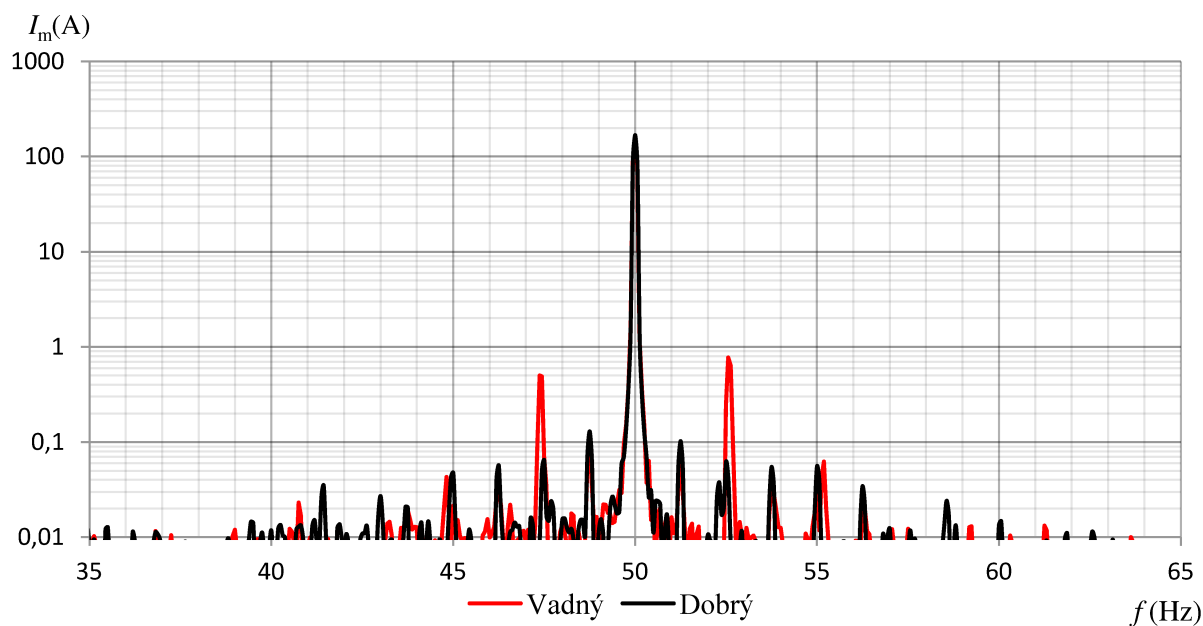


Obr. 18: Postranní pásma při 100%P_n

Pracovní bod 150% P_n

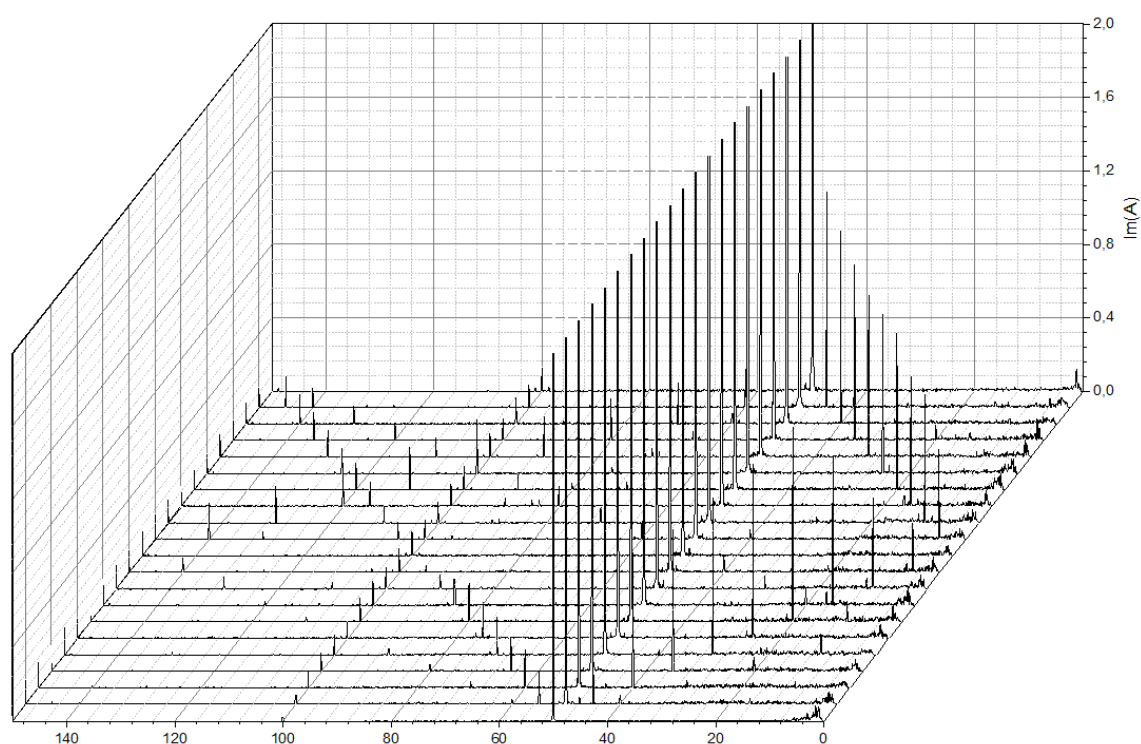
Tab. 5: Postranní pásma při 150%P_n

<i>P= 150% P_n</i>		<i>n=1461 (min⁻¹)</i>		<i>s=2,6 (%)</i>	
<i>f_i</i> (Hz)	<i>I_m</i> (A)	<i>f_{p-}</i> (Hz)	<i>I_m</i> (A)	<i>f_{p+}</i> (Hz)	<i>I_m</i> (A)
50	166	47,375	0,503	52,625	0,776



Obr. 19: Postranní pásma při 150%P_n

Při dalším měření byl motor připojen na 50 Hz zdroj s napětím 100V. Napájecí napětí bylo sníženo z důvodu snížení oteplování při měření ve velkých skluzech. Pro provoz motoru v celém rozsahu momentové charakteristiky bylo nutné na brzdícím dynamometru nastavit otáčkovou prioritu. Díky této funkci bylo možné měření v nestabilní části momentové charakteristiky. Na obrázku č.XX je možné vidět závislost postranních pásem v závislosti na skluzu od stavu naprázdno až do zátěžného stavu. Pro dobrou názornost postranních pásem je vyobrazena pouze část lineárního grafu do hodnoty amplitudy 2A.

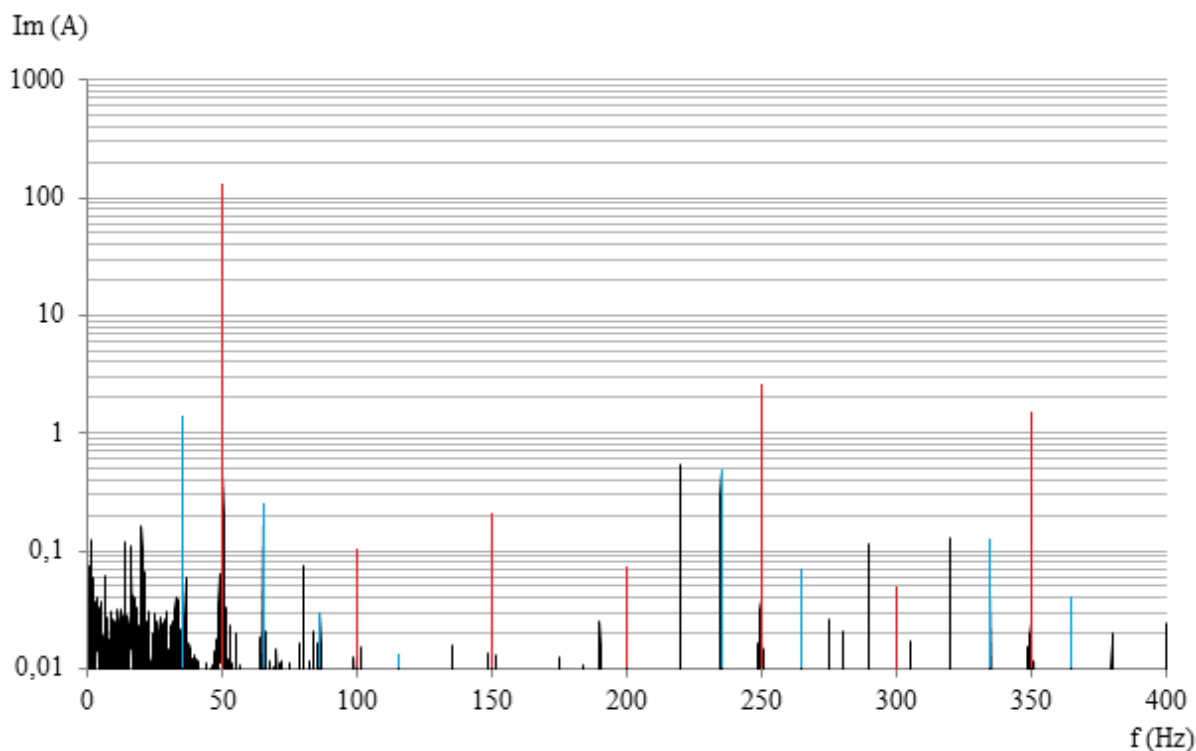


Obr. 20: Kaskádový graf závislosti frekvence a amplitudy postranních pásem na skluzu motoru

Tab. 6: Amplitudy postranních pásem při změně skluzu

s (-)	f_{p-} (Hz)	I_m (A)	f_{p+} (Hz)	I_m (A)
0,05	45	0,85	55	0,25
0,1	40	1,05	60	0,28
0,15	35	1,09	65	0,27
0,2	30	1,2	70	0,28
0,25	25	1,34	75	0,28
0,3	20	1,5	80	0,3
0,35	15	1,15	85	0,2
0,4	10	0,71	90	0,11
0,45	5	0,38	95	0,06
0,5	0	0	100	0,2
0,55	5	0,69	105	0,13
0,6	10	0,99	110	0,13
0,65	15	1	115	0,18
0,7	20	1,2	120	0,2
0,75	25	1,23	125	0,18
0,8	30	1,24	130	0,21
0,85	35	1,34	135	0,21
0,9	40	1,48	140	0,23
0,95	45	1,65	145	0,24

Další měření bylo provedeno při $U=200V$ a frekvenci $f=50Hz$ a při skluzu $s=15\%$. Podstatou měření byl záznam postranních u vyšších harmonických složek. Jak je možné vidět v grafu č. **xx**, postranní pásma jsou vidět u většiny harmonických vyšších řádů. Zejména pak u 5. a 7. harmonické, respektive u 250Hz a 350Hz..



Obr. 21: Frekvenční spektrum s postranními pásmy kolem vyšších harmonických

V následující tabulce je možné vidět konkrétní hodnoty amplitud postranních pásem kolem proudů vyšších harmonických.

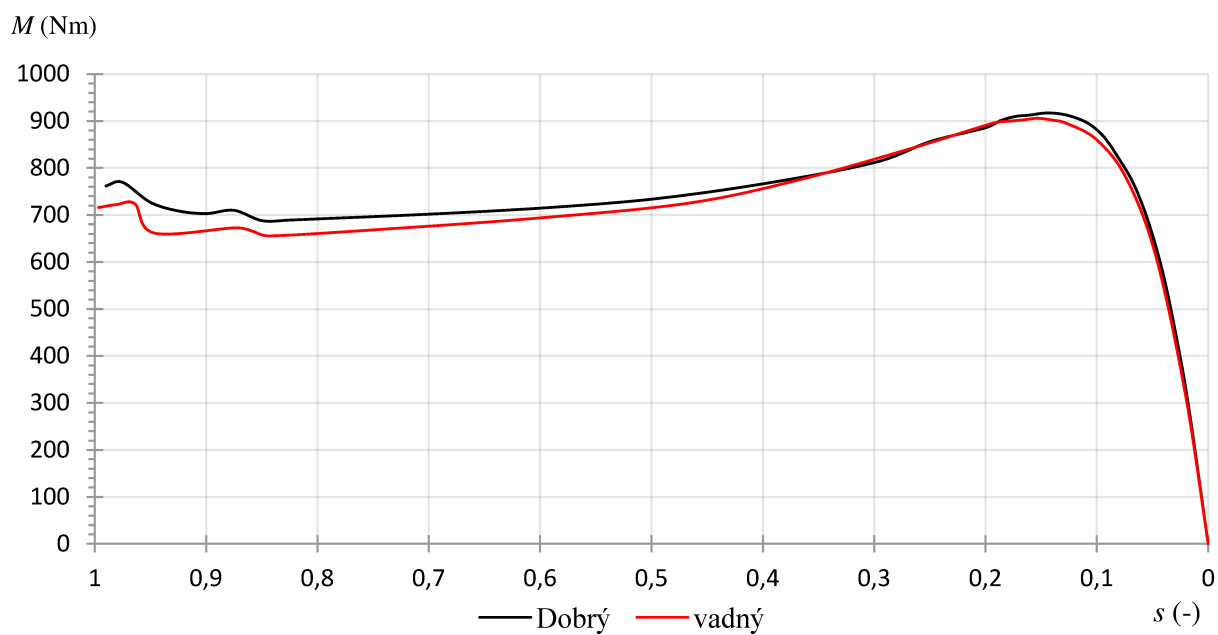
Tab. 7: Amplitudy postranních pásem vyšších harmonických

n	$f_1 \cdot n$ (Hz)	I_m (A)	F_{p-} (Hz)	I_m (A)	f_{p+} (Hz)	I_m (A)
1	50	241	35	2,58	65	0,41
2	100	0,16	85	0,01	115	0,01
3	150	0,34	135	0,03	165	0,01
4	200	0,10	185	0,01	215	0,01
5	250	3,49	235	0,49	265	0,07
6	300	0,06	285	0,01	315	0,01
7	350	1,84	335	0,12	365	0,04

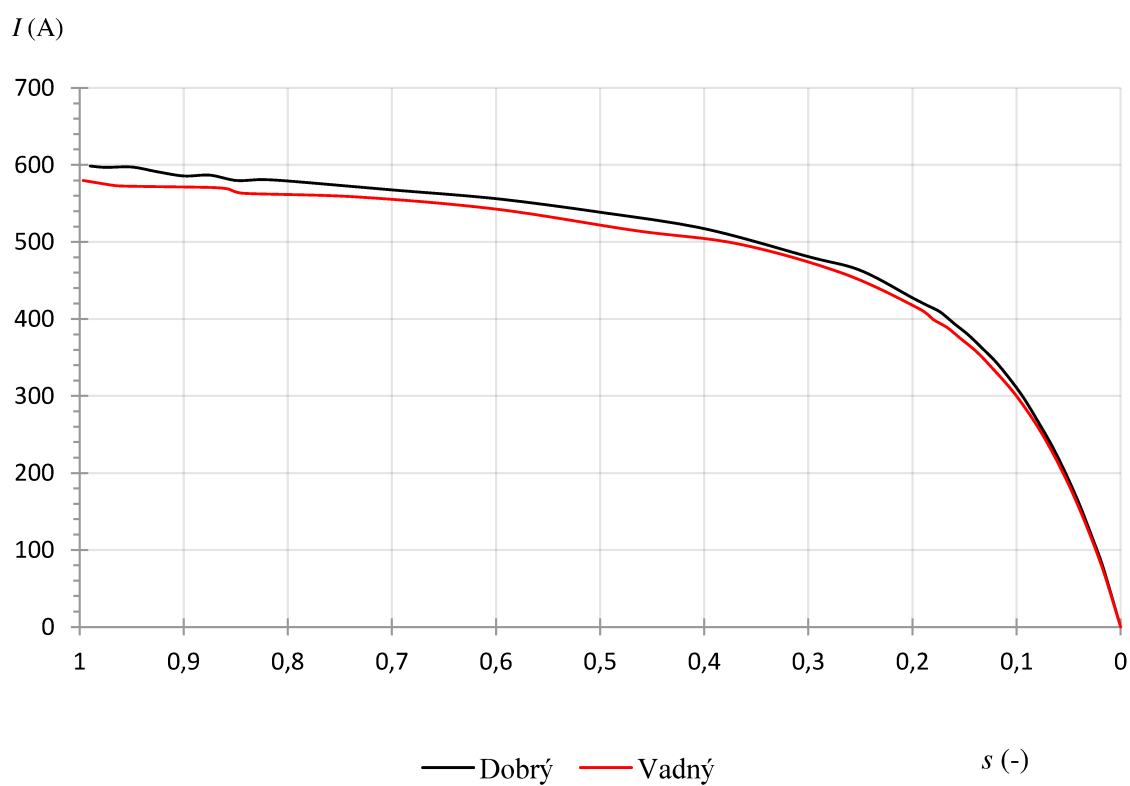
3.3 Typová zkouška

Na motoru s oběma variantama rotorů proběhla také typová zkouška. Na některých částech měření typové zkoušky je možné postřehnout rozdílné parametry mezi oběma motory. Jelikož byl proveden zásah do té části rotoru, která ovlivňuje především záběrné parametry motoru, v momentové charakteristice zaznamenáme pokles při vyšších hodnotách skluzu. Rozběhová část Boucherotovy klece má samozřejmě vliv na momentovou křivku v celém jejím rozsahu, takže je zřetelný pokles

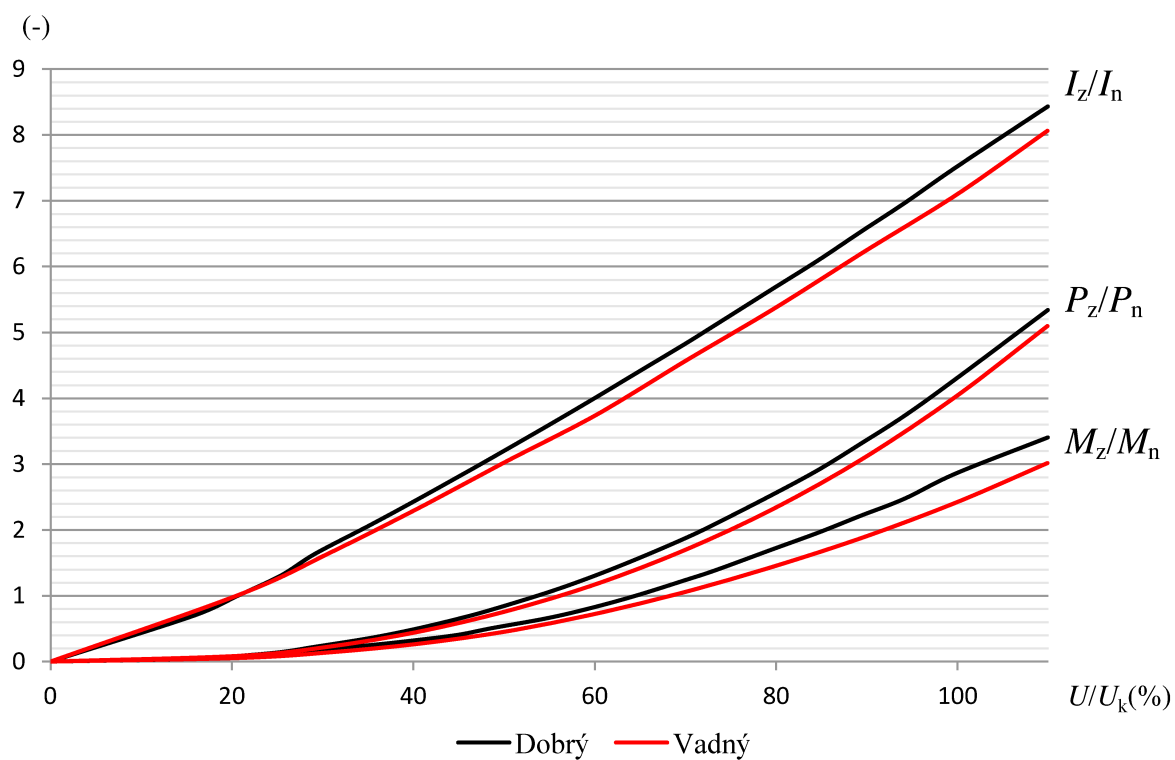
momentu zvratu přibližně o hodnotu 20Nm. V dalších grafech je možné vidět porovnání vybraných křivek měřených při typové zkoušce.



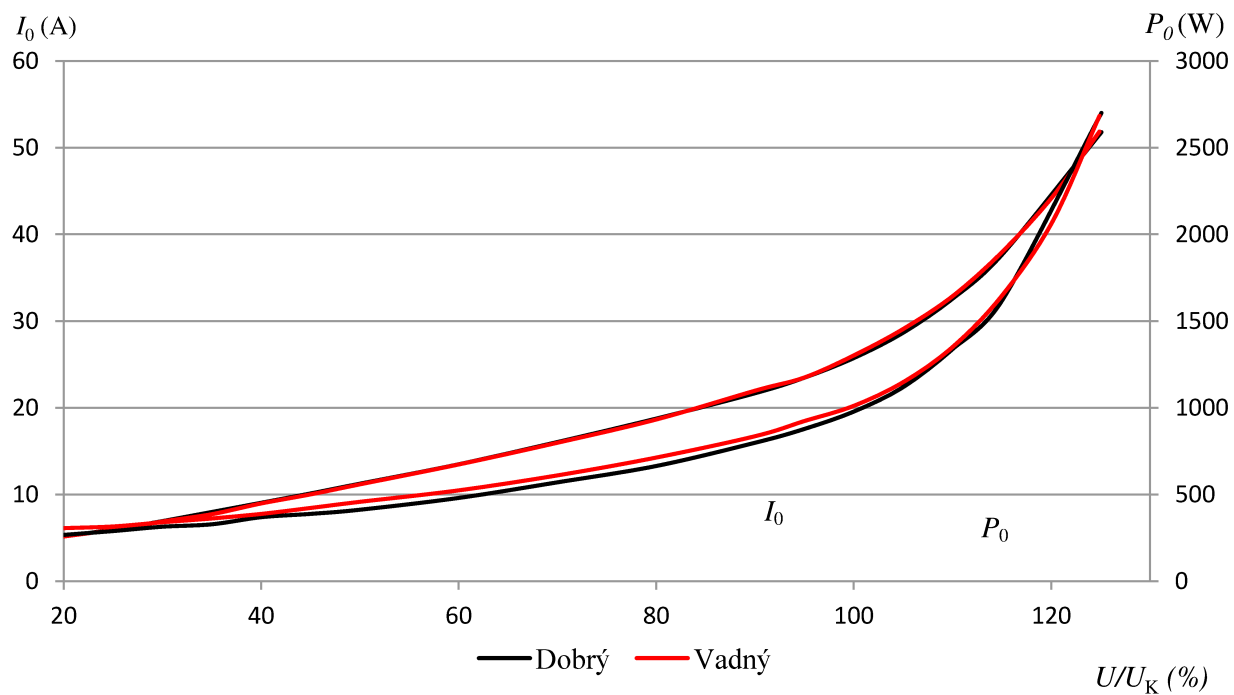
Obr. 22: Momentová charakteristika



Obr. 23: Závislost proudu na skluzu



Obr. 24: Charakteristiky nakrátko



Obr. 25: Charakteristiky naprázdno

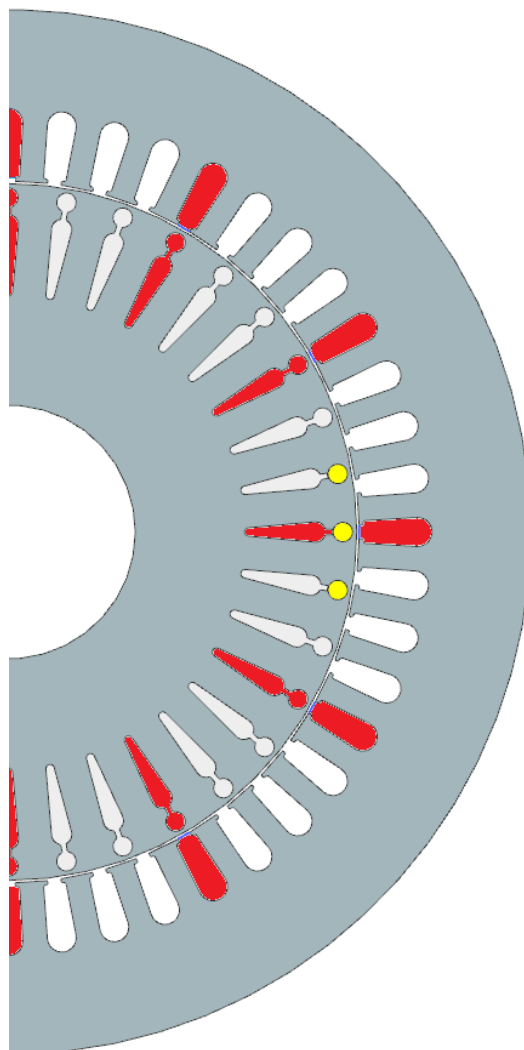
Tab. 8: Srovnání některých parametrů typových zkoušek

	Jednotka	Dobrý rotor	Vadný rotor
Moment	Nm	291,7	291,7
Příkon	W	48329	47410
Proud	A	79,9	80,2
Účinek	-	0,873	0,872
Účinnost	%	93,11	92,96
Otáčky	min^{-1}	1473,4	1472,0
Skluz	-	1,77	1,864
Oteplení čela vinutí	K	75,61	76,95
Poměrný záběrný moment	-	2,83	2,6
Poměrný záběrný proud	-	7,49	7,1
Ztráty rotorové klece	W	822	867
Ztráty statorového vinutí	W	1289	1308
Proud naprázdno	A	25,7	25,9
Příkon naprázdno	W	978	1014
Účinek naprázdno	-	0,055	0,056
Napětí nakrátko	V	73,7	73,8

Jak je možné vidět z výsledků měření, vada rozběhové klece ovlivňuje všechny parametry daného stroje. I když se porucha týká pouze rozběhové části rotorové klece, porucha ovlivňuje motor v oblasti celé momentové charakteristiky. Výraznější vliv má tato porucha na tu část momentové charakteristiky v oblasti vyššího skluzu.

3.4 Měření záběrných hodnot

Podstatou následujícího měření bylo zjištění záběrných parametrů motoru v závislosti na natočení rotoru. Jelikož mají aktivní části konečný počet fází a drážek, záběrné hodnoty jsou závislé na vzájemné poloze statoru a rotoru. Mezi faktory ovlivňující tuto skutečnost patří především poměr a tvar drážek statorového a rotorového paketu, velikost vzduchové mezery, a především pootočení rotorové drážky. Často používané rotory se zešíkmenou drážkou po celé délce rotoru nebo se zešíkmením ve tvaru šípů dokážou částečně eliminovat závislost záběrných parametrů na poloze rotoru.

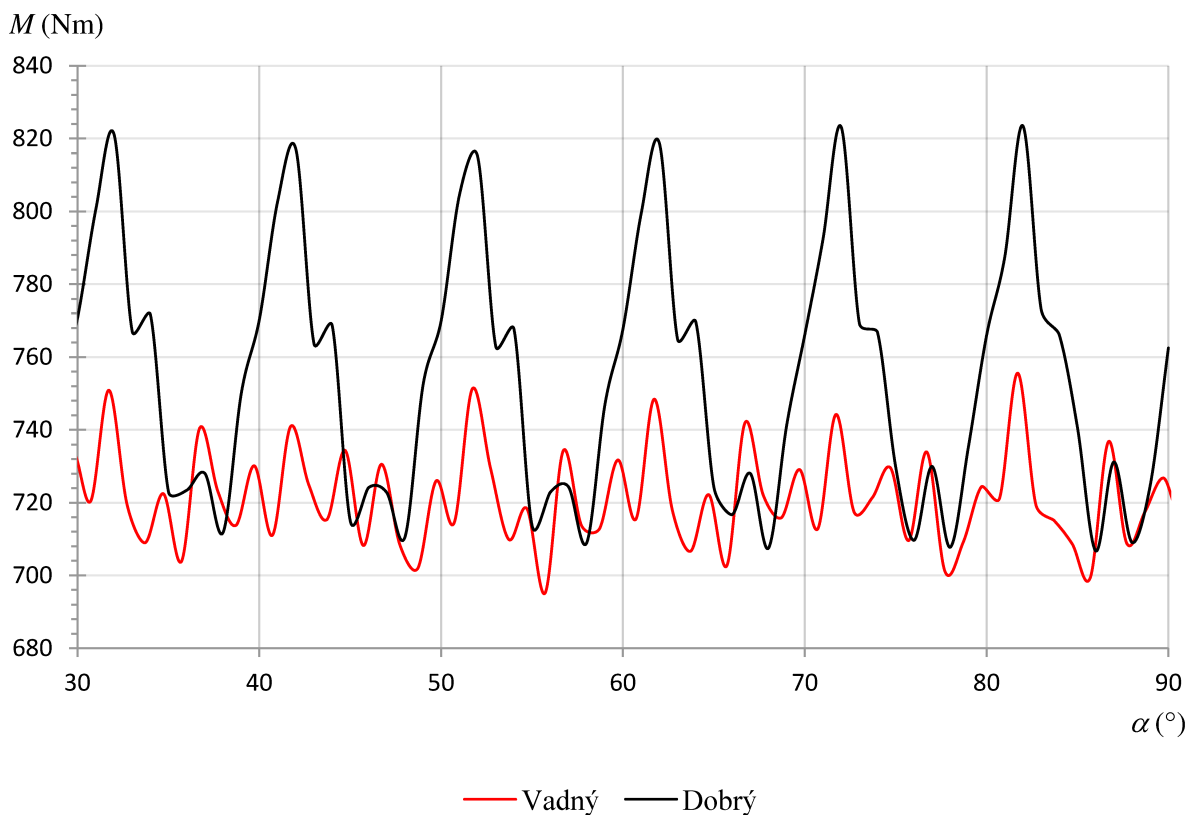


Obr. 26: Vzájemná poloha drážek statoru a rotoru

Jak je vidět na obrázku číslo 27, záběrný moment u nezávadného rotoru ve tvaru šípu se opakuje s periodou 10° . Tato perioda odpovídá úhlové výše mezi dvěma sousedními fázemi rotoru. Počet minimálních a počet maximálních záběrných momentů při otočení rotoru o 360° je tedy dán počtem rotorových fází, který je v tomto případě 36.

V případě poškozeného rotoru je vidět výrazný pokles maximálního záběrného momentu. Zde mimo drážkování rotoru má také významný vliv počet drážek statoru. Perioda momentu u poškozeného rotoru tedy závisí na vzájemné poloze zubů statoru a rotoru, která musí být stejná. Počet stejných vzájemných poloh na jednu otočku rotoru je dána nejmenším společným dělitelem počtů drážek rotoru a statoru. Pokud tímto číslem vydělíme počet zubů rotoru, získáme počet period, při kterých se mění záběrný moment. Při kombinaci drážek 48 a 36 je perioda 30° , čemuž odpovídá

měření na vadném rotoru v obrázku číslo 27. Opakující se vzájemnou polohu drážek statotu a rotoru je možné vidět na obrázku číslo 26.



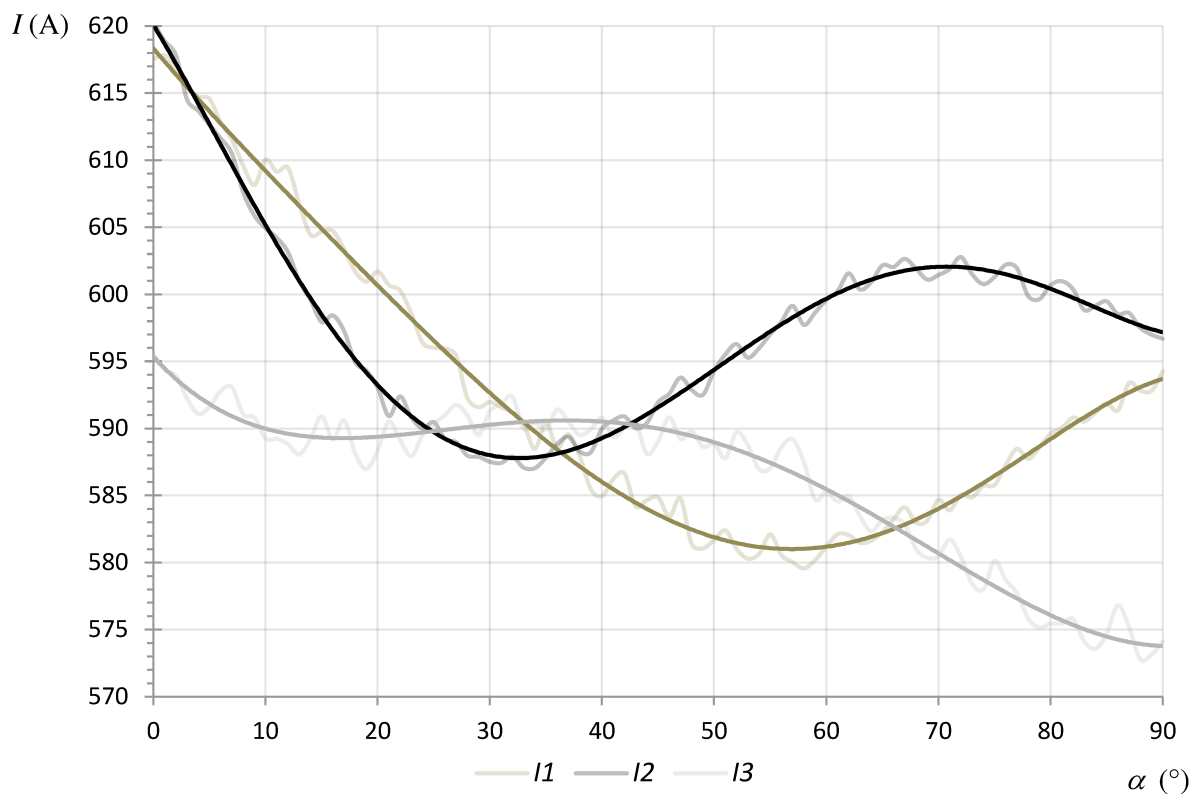
Obr. 27: Závislost záběrného momentu na úhlu natočení rotoru

Při měření závislosti proudu na úhlu natočení rotoru je situace podobná jako při měření momentu. Perioda proudů jednotlivých fází závisí na počtu rotorových tyčí.

V případě měření proudu u motoru s porušeným rotorem má ještě navíc vliv počet pólů stroje. Změna proudu dané fáze se nejvíce projeví v případě, kdy je porušená část motoru pod statorovou cívkou dané fáze. V tomto případě jsou takové polohy 4, kde je stejná poloha zubů statoru a rotoru a současně je v dané drážce uloženo vinutí jedné fáze.

Tuto skutečnost je prakticky náročné ověřit měřením, protože vinutí stroje se při měření se zablokovaným rotorem velmi rychle zahřívá a tím pádem měřený proud klesá z důvodu rostoucího odporu vinutí. Tento fakt se dá částečně eliminovat snížením napájecího napětí při konstantní frekvenci.

Při tomto měření bylo vinutí stroje zapojeno do trojúhelníku, takže není jednoznačné, ve které poloze se rotor aktuálně nacházel. Při měření v zapojení do hvězdy by byl patrný pokles proudu ve fázi, pod kterou se zrovna poškození v rotoru vyskytuje.



Obr. 28: Závislost záběrného proudu na úhlu natočení rotoru

3.5 Seznam měřících zařízení

Rotační zdroj Siemens

Frekvenční analyzátor - Adash A4400 – VA4 Pro

Rogowského cívka - Power Electronic Measurements - CWT6

Multimetr - Fluke 289

Ohmmetr AOIP - OM21

Příruba pro měření momentu - HBM T40B/5kNm

Wattmetr - Yokogawa WT1600

Měřicí stanoviště VUES Brno

4.0 Vyhodnocení a rozbor vlastností použití frekvenční analýzy v diagnostice

Jak již bylo dříve zmíněno, velkou výhodou této metody je možnost diagnostiky motoru při jeho běžném provozním stavu. Lze tak diagnostikovat případnou poruchu stroje bez nutné odstávky a případně demontáže celého stroje. Touto metodou lze případně odhalit poškození rotoru přímo po vyrobení stroje. Je také možnost diagnostikovat poruchu stroje již zabudovaného do pohonné soustavy.

Tato metoda umožňuje zjištění rovnoměrnosti vzduchové mezery, jinými slovy je možné diagnostikovat statickou, nebo dynamickou excentricitu vzduchové mezery. Je to jedna z mála metod, pomocí které lze parametr vzduchové mezery ověřit. Různé měření excentricity rotoru pomocí mechanických měrek si zpravidla vyžadují zásah do štítu motoru.

Jistota vyhodnocení výsledků měření je závislá na rozsahu porušení rotorového obvodu, případně na míře velikosti excentricity. V případě prasknutí několika rotorových tyčí bude výsledek jednoznačně ukazovat na tuto poruchu. V případě malé vzduchové bubliny v rotorové tyči se postranní pásma neprojeví vůbec. Je to dáno tím. Rotor u asynchronního motoru s klecí nakrátko je tvořen velkým množstvím jednotlivých fází. Při porušení malého procenta vodivé cesty těchto tyčí je změna parametrů velmi malá a mnohdy nerozlišitelná od dalších signálů.

V tomto případě byla v rotoru se 36 drážkami nahrazena rozběhová část tří drážek. Amplituda postranního pásma u tak velkého zásahu byla o 46dB menší vůči amplitudě síťové frekvence. Výsledná amplituda postranního pásma tedy nebyla ani setinová vůči amplitudě napájecí frekvence.

Při této metodě je třeba brát v úvahu vliv napájecí sítě v místě připojení stroje. Jelikož analyzovaný motor je obvykle umístěn v soustavě dalších pohonů a pracovních mechanismů, můžou i tyto zařízení vykazovat vady a tím pádem spektrum daného motoru ovlivnit.

Jako doplňkovou metodu lze použít analýzu vibračních spekter, která je částečně podobná a měření proudových spekter proudu. Každá porucha rotoru se projeví ve spektru zvýšením amplitudy dané frekvence charakteristické pro danou závadu. Při této metodě lze také zjistit nadměrné opotřebení ložisek, po případě nesprávné ustavení pohonu vůči poháněnému mechanismu.

Stejně jako u proudových spekter je třeba brát v úvahu možnost ovlivnění měření okolními zařízeními. Velký vliv může mít například umístění stroje, nebo pracovního mechanismu v blízkosti měřeného zařízení.

Analýzu statorových proudů a vibrací lze obvykle využít současně a to za pomoci jednoho frekvenčního analyzátoru. Podmínkou je vícekanálový analyzátor, pro současné připojení proudové sondy (například Rogowského cívky) a akcelerometru.

Závěr

Účelem této práce bylo praktické využití diagnostiky pomocí frekvenční analýzy statorových proudů. Pomocí této nedestruktivní metody bylo možné diagnostikovat skrytou vadu nedolitě rotorové klece asynchronního motoru s kotvou nakrátko.

Pro tyto účely byl vyroben rotor, který vykazoval vadu v rozběhové rotorové kleci. Jelikož se jednalo o rotor s uzavřenými drážkami, nebylo by možné běžným způsobem závadu odhalit vizuálně. Tato metoda je velmi výhodná pro diagnostiku stroje především z toho důvodu, že ji lze použít za běžného provozního stavu bez odstávky stroje. Mimo vady rotorové klece je možné analýzou statorových proudů zjistit další poruchy stroje například excentricitu. Při praktickém měření byla také ověřena závislost frekvence postranních pásem na skluzu motoru. Tato závislost byla prezentována na kaskádovém grafu.

Jako doplňková metoda byla použita analýza statorových proudů v závislosti na úhlu natočení rotoru v záběrném stavu. Díky této metodě lze také odhalit nesymetrii v rotorové kleci. Tato metoda má ovšem méně praktické využití v praxi. Mezi základní nevýhody se řadí především nutnost montáže motoru na měřicí přírubu momentu, která umožňuje změnou pozice rotoru u záběrném stavu. Další nevýhodou této metody je značné zahřívání vinutí i během krátkého měření. Toto rychlé oteplení vinutí výrazně ovlivňuje velikost proudu tekoucí vinutím.

V neposlední řadě byla na motoru s poruchou i bez poruchy provedena typová zkouška, pomocí které bylo možné zhodnotit vliv nedolitě rozběhové klece u asynchronního motoru. Jak bylo možné vidět, porucha ovlivnila téměř všechny parametry motoru. Možnost odhalení této vady je možná například pomocí napětí nakrátko. Jelikož jsou ale cívky vinutí a rotorové tyče uloženy do konečného počtu drážek, je toto napětí ovlivněno pozicí rotoru vůči statorovému paketu. Z toho důvodu během nevyhovujících parametrů je třeba motor podrobit další podrobné analýze pomocí statorových proudů.

Seznam použité literatury

- [1] PETROV, G. N.. Elektrické stroje 2. Praha: Academia, 1982 ISBN 80-901985-0-3
- [2] BOLDEA, I. a S. A. NASAR. The induction machine handbook. Boca Raton: CRC Press, 2002, ISBN 0-8493-0004-5
- [3] HRABOVCOVÁ, Valéri. Meranie a modelovanie elektrických strojov. 3. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline 2014, ISBN 9788055408521
- [4] TŮMA, Jiří . Zpracování signálů získaných z mechanických systémů FFT, Štramberk, ISBN 80-901936-1-7
- [5] CHMELÍK, Karel . Technická diagnostika na elektrických zařízeních
- [6] KOLCUNOVÁ, Irida. Diagnostika elektrických strojov, Technická univerzita Košice 2006, ISBN 80-8073-550-6
- [7] SOKANSKÝ, Karel, Diagnostika vybraných poruch asynchronních motorů pomocí proudových spekter, VŠB-TUO
- [8] http://www.cs.vsb.cz/arg/worconf/wofex/2003/paper/p2645/pohony/pospisilik_jiri.pdf
- [9] <http://amber.feld.cvut.cz/vyu/zs/zs9/c8.htm>